



**Marta Sofia  
Tavares Teixeira**

## **“Previsão” de tornados através da análise de índices de instabilidade**





**Marta Sofia  
Tavares Teixeira**

## **“Previsão” de tornados através da análise de índices de instabilidade**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Meteorologia e Oceanografia Física, realizada sob a orientação científica de Alfredo Rocha, Professor Associado com Agregação do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.



## **o júri**

presidente

**Prof. Doutor José Manuel Henriques Castanheira**  
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

**Prof.Doutora Maria Solange Mendonça Leite**  
Prof. Auxiliar com Agregação Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

**Prof. Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha**  
Professor Auxiliar com Agregação da Universidade de Aveiro



## **agradecimentos**

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Alfredo Rocha pela orientação e pela disponibilidade que teve ao longo de todo o processo, ao Tiago Luna pela disponibilidade e por todo o apoio informático prestado.

A todos os meus amigos em especial a Susana, Ana, Sofia e Dora por me aconselharem e pelo apoio que me deram.

Gostaria ainda de agradecer em especial ao meu namorado pelo seu apoio incondicional, e aos meus pais e família que criaram condições para que terminasse mais uma etapa do meu percurso académico.





**palavras-chave**

Tornado, supercélulas, índices de instabilidade, WRF

**resumo**

A ocorrência de tornados desperta a curiosidade da comunidade científica para o seu estudo. No entanto para a península ibérica os estudos efetuados são poucos, quando comparados com outros locais, e a sua “previsão” é dificultada pelas suas dimensões reduzidas. Com este trabalho pretende-se tentar colmatar esta lacuna e prever a ocorrência de tornados através da análise de vários índices de instabilidade. Para isso recorreu-se a simulações provenientes do WRF referentes aos tornados ocorridos em Silves e em Málaga, a 16 de Novembro de 2012 e a 17 de Novembro de 2012 respetivamente. Calcularam-se diferentes índices de instabilidade, termodinâmicos, dinâmicos e compostos, e concluiu-se que existe uma grande variedade destes índices que prevêem a ocorrência de condições atmosféricas que favoreceram a formação de ambos os tornados. O vento de corte e a helicidade para os 0-1 km identificaram condições favoráveis à ocorrência destes tornados, assim como o índice VT, CT, EHI e as diferentes formulações do índice STP. No entanto, alguns índices apresentam valores positivos para a ocorrência de tornados apenas para um dos locais. É de salientar, que para a ocorrência de tornados para a península ibérica não é necessária a existência de elevados valores de CAPE. Futuramente seria útil aplicar o mesmo conjunto de índices de instabilidade a outros tornados ocorridos e validar a sua eficácia na “previsão” inequívoca de condições atmosféricas associadas à formação de tornados.



**keywords**

Tornado, supercell, Instability indices, WRF

**abstract**

The occurrence of tornadoes arouses the curiosity of the scientific community for their study. However, for the Iberian Peninsula few studies were performed when compared to other places and their prediction is hampered by their typically small dimensions. With this work we intend to try to bridge this gap and to predict the occurrence of tornadoes through the analysis of several indices of instability. For this, we used the WRF to simulate the periods when tornadoes occurred in Silves and Málaga on November 16, 2012, and November 17, 2012, respectively. Different indices of thermodynamic and dynamic and composit instability were calculated. We conclude that a variety of these indices predicted atmospheric conditions which favored the occurrence of both tornadoes. The wind shear and helicity for 0-3 km identified atmospheric conditions which favored the formation of these tornadoes, as the index VT, CT, EHI, and different formulations of the STP index. However, some indices proved efficient in the detection of the occurrence of tornadoes in only one of these locations. One should note that for the occurrence of tornadoes in the Iberian peninsula is not necessary associated to high values of CAPE. In the future it would be useful to apply the same set of indices of instability to other tornadoes and to validate their effectiveness in forecasting atmospheric conditions associated to tornado formation.



# Índice

Índice de figuras .....	iii
Índice de tabelas .....	v
Acrónimos .....	vii
1.Introdução.....	1
2.Estado de Arte.....	6
3.Métodos e Dados .....	7
3.1.Modelo.....	7
3.2.Simulações .....	8
3.3.Métodos.....	11
3.3.1. Índices termodinâmicos .....	11
3.3.2. Índices de instabilidade dinâmica.....	17
3.3.3. Índices Compostos.....	18
4. Análise e discussão dos resultados.....	23
4.1. Índices termodinâmicos .....	26
4.2. Índice de instabilidade dinâmica .....	32
4.3. Índices compostos.....	35
5. Conclusões .....	40
6. Lista de Referências.....	41



## Índice de figuras

Figura 1 - Número médio de dias com ambientes favoráveis a ocorrência de supercélulas. Este campo foi obtido tendo em conta a presença de forte cisalhamento na camada profunda da troposfera, valores de CAPE (necessária a formação de supercélulas) assim como vento de corte forte na camada superficial e elevados valores de humidade (que indicam elevada probabilidade de ocorrência de tornados na supercélula). O comportamento climatológico de dias com supercélulas e com ocorrência de tornados foi obtido com base na análise de dados globais do programa de reanálise e mostra a instabilidade atual nos relatórios de tornados e de supercélulas-tornados associados a maioria do planeta (Brooks et al., 2003). ....	1
Figura 2- a) Demonstração de como um tornado pode surgir a partir da existência de vorticidade vertical a partir do solo. b) Formação de um tornado quando a vorticidade vertical inicial pode ser negligenciada (Fonte : Markowski e Richardson, 2010). ....	4
Figura 3 – Domínios em estudo. Fonte : Google Earth. ....	9
Figura 4- Água Precipitável (em mm) para Silves às 13h do dia 16/11/2012 a), e para Málaga às 11h do dia 17/11/2012 b). ....	23
Figura 5- Campos de a) pressão (hPa) e vento a superfície (m/s) para às 14h do dia 16/11/2012 e b) a temperatura a 2m (°C) para as 10h do dia 16/11/2012. ....	24
Figura 6 - Campo da a) vorticidade( $s^{-1}$ ) aos 500hPa para as 12h do dia 16/11/2012 e b) vorticidade( $s^{-1}$ ) aos 500hPa para o dia 17/12/2012 às 9h. ....	24
Figura 7- Imagens de satélite AVHRR (NOAA) no infravermelho, no canal 4. As áreas onde o vapor de água são superiores encontram-se a branco. A imagem da esquerda corresponde ao dia 16/11/2012 às 13h45 e a imagem da direita corresponde ao dia 17/11/2012 às 10h08. Fonte : NERC Satellite Receiving Station, Dundee. ....	25
Figura 8- Skew-T obtido para Silves às 13h do 16/11/2012 em a). Skew-T obtido para Málaga às 10h do 17/11/2012. ....	26
Figura 9- Campo do índice VT para o domínio 3, em que em a) representa a 16/11/2012 às 14h. A imagem b) corresponde ao campo VT para o domínio 4, em Málaga, às 11h do dia 17/11/2012. ....	31
Figura 10- Campo do índice CT para o domínio 3, em que em a) representa a 16/11/2012 às 14h. A imagem b) corresponde ao campo CT para o domínio 4, em Málaga, às 11h do dia 17/11/2012. ....	31
Figura 11- Vento de corte (m/s) para o primeiro quilómetro para o instante 16/11/2012 às 14h em Silves a). Para o mesma camada mas para o instante 17/11/2012 as 10h c) para Málaga. Vento de corte (m/s) para os primeiros 6 km para o instante 16/11/2012 às 14h em Silves b). Para a mesma camada mas para o instante 17/11/2012 às 10h d) para Málaga. ....	34

Figura 12- Índice STP onde a) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e b) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012. Índice STP (utilizando mlCAPE) onde c) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e d) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012. Índice STP (utilizando sbCAPE) onde e) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e f) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012. ....38

Figura 13- Índice EHI para Silves onde a) corresponde a EHI 0-1 km e b) corresponde a EHI 0-3 km. Índice EHI para Málaga onde c) corresponde a EHI 0-1 km e d) corresponde a EHI 0-3 km.....39



## Índice de tabelas

Tabela 1 - Espaçamento espacial do modelo e intervalo de amostragem dos dados de saída. ....	9
Tabela 2 - Parametrizações utilizadas no WRF. ....	10
Tabela 3 - Valores padrão do CAPE que caracterizam o ambiente (Fonte: <a href="http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/">http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/</a> ). ....	12
Tabela 4 - Valores padrão para o índice K (Fonte: <a href="http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/">http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/</a> ). ....	14
Tabela 5- Valores de referência para CT (Fonte: <a href="http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/">http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/</a> ). ....	15
Tabela 6 - Valores de referência e possíveis observações (Fonte: <a href="http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/">http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/</a> ). ....	16
Tabela 7- Valores padrão para LI (Fonte: <a href="http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/">http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/</a> ). ....	16
Tabela 8 - Valores do vento de corte e respetiva intensidade (Fonte: <a href="http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/">http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/</a> ). ....	18
Tabela 9 - Valores padrão para SWEAT (Fonte: <a href="http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/">http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/</a> ). ....	19
Tabela 10 - Valores de EHI com possíveis observações (Fonte: <a href="http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/">http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/</a> ). ....	22
Tabela 11- Valores dos índices termodinâmicos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4. ....	30
Tabela 12- Valores dos índices dinâmicos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4. ....	33
Tabela 13 - Valores dos índices compostos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4. ....	36



## Acrónimos

BRN – número de Bulk Richardson

BRN shear – número de Bulk Richardson de corte

BWD – Vento de corte

CAPE – Energia potencial disponível para convecção (*convective available potential energy*)

CIN – Índice de inibição de convecção

CSSP – Craven *Significant Severe Composite*

CT – *Cross totals*

EF – Escala Fujita Melhorada

EHl – *Energy-Helicity index*

EL – Nível de equilíbrio (*Equilibrium Level*)

GFS – Sistema de previsões global (*Global Forecast System*)

GRADS – *Grid Analysis and Display System*

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

K – índice K

LCL – nível de condensação (*Lifted condensation level*)

LI – *lifted index*

NOAA – National Oceanic and atmospheric administration

SCP – *supercell composite parameter*

SPC – *Storm Prediction Center*

SRH – Helicidade

STP – *Significant tornado parameter*

SWEAT – *Severe Weather Threat Index*

T – Escala de TORRO

TORRO – *Tornado and storm Research Organisation*

TT – *Total totals*

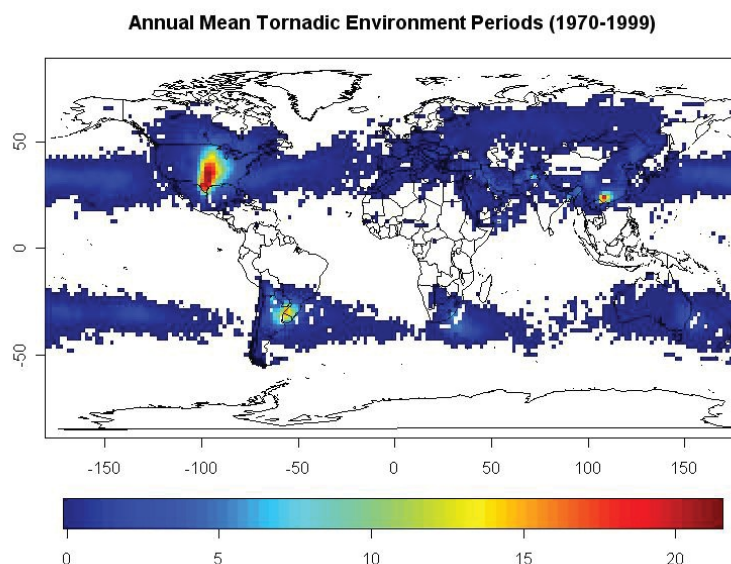
UTC – Tempo universal coordenado (*Universal Time Coordinated*)

VT – *Vertical totals*

WRF – *Weather Research and Forecasting*

## 1.Introdução

Os tornados são violentas colunas de ar em rotação geralmente associadas a uma nuvem rodopiante de detritos e poeiras junto ao solo, tendo a forma de funil, estendendo-se abaixo da base de um *cumulonimbus*. A maioria dos tornados tem um tempo de duração inferior a 10 minutos mas há registros de existência de tornados com tempo de vida próximos de uma hora ou mais. Quer a sua longevidade quer o seu diâmetro influenciam a sua intensidade e vice-versa. Os tornados estão associados a convecção profunda onde a maioria dos tornados e os mais violentos desenvolvem-se a partir das supercélulas. No entanto, há ocorrência de tornados que não provêm das supercélulas sendo mencionados na literatura como tornados não-mesociclônicos. Contudo, existem locais no planeta mais propensos à ocorrência de tornados sendo também os mais comuns os tornados provenientes das supercélulas (figura 1).



**Figura 1 - Número médio de dias com ambientes favoráveis a ocorrência de supercélulas. Este campo foi obtido tendo em conta a presença de forte cisalhamento na camada profunda da troposfera, valores de CAPE (necessária a formação de supercélulas) assim como vento de corte forte na camada superficial e elevados valores de humidade (que indicam elevada probabilidade de ocorrência de tornados na supercélula). O comportamento climatológico de dias com supercélulas e com ocorrência de tornados foi obtido com base na análise de dados globais do programa de reanálise e mostra a instabilidade atual nos relatórios de tornados e de supercélulas-tornados associados a maioria do planeta (Brooks et al., 2003).**

Os Estados Unidos da América são um dos locais com maior propensão à ocorrência de tornados devido à proximidade das águas quentes do Golfo do México a Sul, à *Rocky Mountains* e dos desertos a elevada altitude a Oeste. As águas quentes a Sul são uma forte fonte de temperatura potencial equivalente na camada mais superficial, enquanto que o calor produzido pela superfície é elevado da superfície a Oeste provocando assim uma diminuição da temperatura induzindo advecção para Este, saturando o ar com elevada temperatura potencial equivalente sendo advectada do norte do Golfo do México. A sobreposição das taxas de decaimento da temperatura potencial equivalente quer na troposfera média quer na camada superior da camada limite dão origem aos elevados valores de CAPE. Contudo, o vento de corte vertical existente na primavera nos Great Plains é também bastante favorável à ocorrência de supercélulas e tornados.

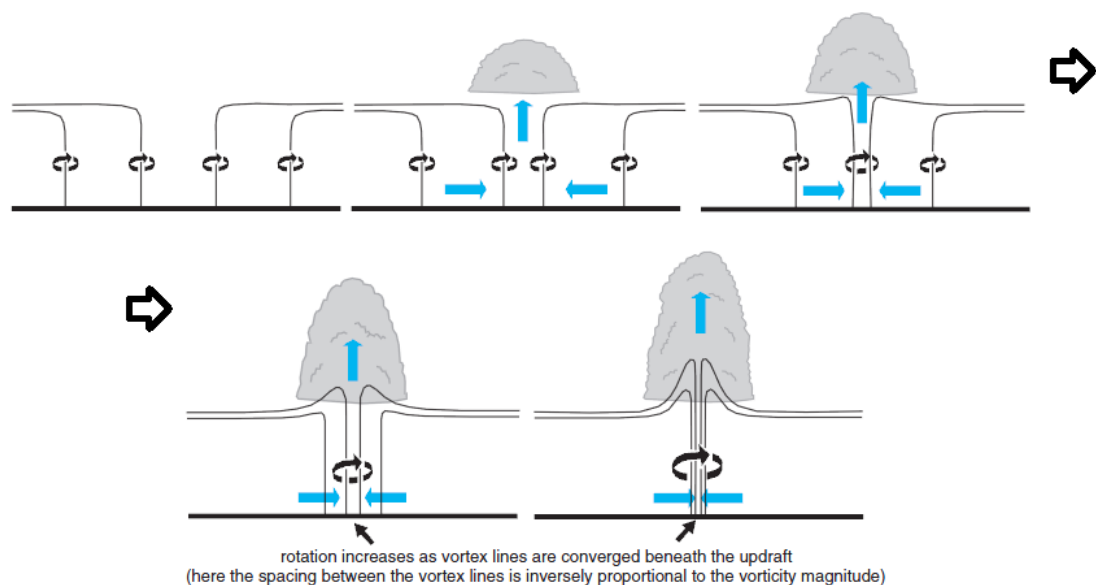
A ausência de barreiras geológicas faz com que as frentes e instabilidade baroclínica, que está associada ao vento de corte vertical e ao vento térmico, permitam que as intrusões sejam regulares. A climatologia favorável ao vento de corte nos Great Plains estará provavelmente relacionada com a presença de uma elevação do terreno a Oeste.

Outros máximos relativos da frequência de supercélulas e tornados, embora menos anómalo na parte central dos Estados Unidos, são também encontrados noutras partes do mundo, a jusante das cadeias montanhosas e a *poleward* dos corpos de águas quentes, como por exemplo o Sudeste da China (a norte do Sul da China e a este do Plateau Tibetano), no Bangladesh (a norte da baía de Bengala e a Sudeste dos Himalaias), a Sul do Brasil (este dos Andes e a Noroeste do oceano Atlântico Sul), em regiões a norte de Itália, Eslovénia e Croácia (a norte do mar Adriático e a sudeste dos alpes). Existem também locais onde a ocorrência de supercélulas não é tão frequente mas onde ocorrem tornados, como por exemplo as trombas de água que ocorrem na Florida Keys e a jusante das ilhas mediterrânicas. No entanto, neste trabalho será dado ênfase apenas aos tornados provenientes de estruturas mesociclónicas.

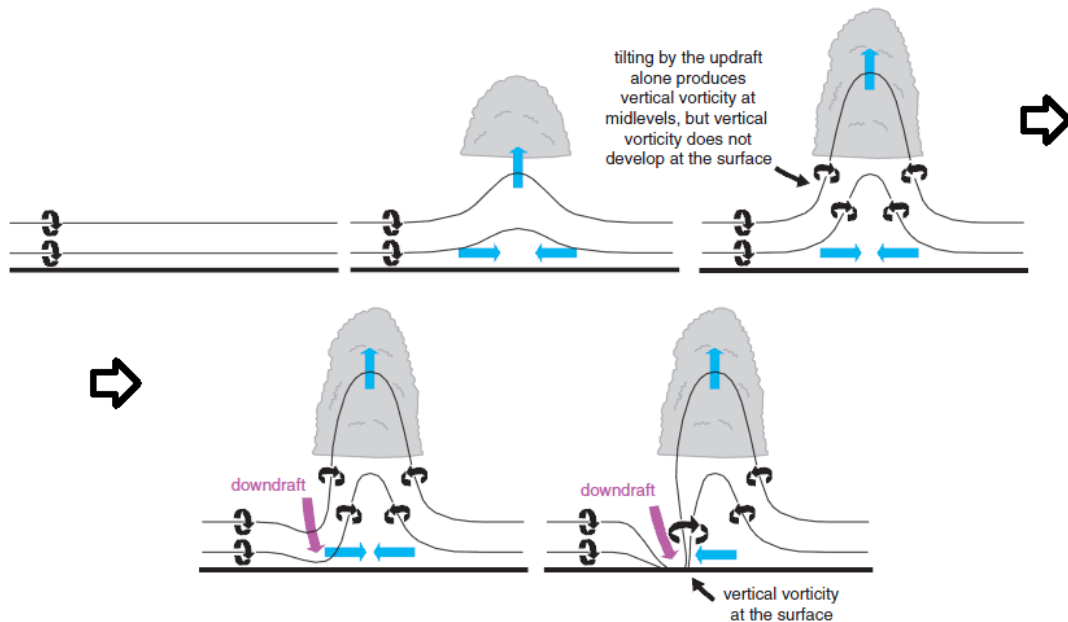
Para ocorrer a formação de tornados é necessária a existência de elevados valores de vorticidade vertical à superfície (Figura 2a). No entanto, a existência de vorticidade vertical junto ao solo for pequena, então a vorticidade vertical deve surgir inicialmente devido à inclinação da vorticidade horizontal ou pela advecção de vorticidade a partir das camadas mais altas em direção a superfície. A inclinação de vorticidade horizontal gerada pelo gradiente horizontal da velocidade vertical associado a uma corrente ascendente não é eficaz na produção de vorticidade vertical junto à superfície, porque o ar sobe afastando-se da superfície quando a vorticidade horizontal é inclinada na vertical. No entanto, se há correntes descendentes envolvidas no processo de

inclinação, então a vorticidade vertical pode ser advectada em direção à superfície devido à inclinação, onde subsequentemente pode ocorrer a formação de um tornado. Deste modo, tem sido argumentado a necessidade de uma corrente descendente para a ocorrência de tornados (Figura 2b). Este argumento depende da fraca intensidade nos *eddys* para transportar a vorticidade vertical contra o fluxo descendente contrário. No entanto, uma vez formado o tornado, a inclinação da vorticidade horizontal na camada junto à superfície pelo forte gradiente vertical da velocidade associada à corrente ascendente do tornado favorece positivamente o aumento significativo da vorticidade vertical à superfície. No entanto os fortes gradientes de pressão e as fortes velocidade verticais não estão presentes no terreno envolvente antes da formação do tornado. Deste modo a inclinação de uma corrente ascendente pode não explicar por si só um aumento da vorticidade vertical junto ao solo que induzirá a formação de um tornado. A importância das correntes descendentes na formação dos tornados foi vastamente estudada quer em simulações numéricas, quer em observações que identificam bem uma corrente descendente por detrás do tornado (RFD- *rear flank downdrafts*), quer em 'hook echoes' e 'clear slots' na proximidade dos tornados.

a)



b)



**Figura 2- a) Demonstração de como um tornado pode surgir a partir da existência de vorticidade vertical a partir do solo. b) Formação de um tornado quando a vorticidade vertical inicial pode ser negligenciada (Fonte : Markowski e Richardson, 2010).**

As análises das trajetórias em conjunto com as simulações efetuadas permitiram concluir que uma parte do ar que entra no tornado passou anteriormente pela RFD.

Markowski e Richardson (2008) verificaram que as linhas de vórtice na proximidade de um mesociclone de baixa altitude revelam uma circulação em “arco” que se encontram com vórtices com rotação contrária em lados opostos do RFD em vez de linhas de vórtice pressionadas em direção ao solo como seria de esperar se uma corrente descendente advectasse as linhas do vórtice. Estas linhas de vórtice arqueadas são consistentes com a noção do papel fundamental da corrente descendente necessária para a formação de rotação junto ao solo. De facto, existe a possibilidade da dinâmica da região da RFD ser dominada por um processo baroclínico em vez da redistribuição da vorticidade. Quando há pré-existência de rotação à superfície não há necessidade, para que ocorra a formação de um tornado, da corrente descendente de RFD. Nesta situação a convergência junto ao solo por si só tem a capacidade de amplificar a vorticidade vertical que por sua vez aumentará a intensidade do tornado, podendo ser esta a origem de ocorrência de tornados que não estão associados a mesociclones.



Em Portugal, acreditava-se que a ocorrência de tornados era muito rara ou simplesmente seriam de fraca intensidade. Contudo, a verdadeira causa para esta falta de conhecimento acerca deste fenómeno é a falta de registo destas estruturas que até há bem pouco tempo não existia (Leitão, 2003). Devido às dimensões dos tornados, fenómeno de microescala, o registo de tornados relativamente a aquisição de dados meteorológicos é de facto o grande entrave à sua identificação. No entanto, o aumento da sua notoriedade nos dias de hoje devido aos estragos provocados assim como as perdas de vidas, fez com que a sua “previsão” fosse um objetivo a cumprir de imediato. Para isso, tentou-se encontrar outra forma de identificar estes fenómenos, pois, devido às suas dimensões, este não seria de tão fácil “previsão” como outros fenómenos meteorológicos. Assim recorreu-se ao cálculo dos parâmetros de instabilidade de modo a que seja possível de identificar quais os parâmetros de instabilidade que melhor identificam este tipo de estruturas. Para isso, usar-se-ão dois casos recentes que remontam ao ano passado, ano 2012, no sul de Portugal e no sul de Espanha.

O tornado de Silves ocorreu a 16 de Novembro de 2012 entre as 13:20 UTC e as 14:00 UTC tendo causado 13 feridos e avultados prejuízos materiais. Este fenómeno meteorológico teve origem mesociclónica, com origem numa das inúmeras estruturas supercelulares identificadas ao longo de uma linha de instabilidade (relatório técnico IPMA), tendo feito um percurso de cerca de 15 km apresentando uma largura máxima de 300 metros. Este tornado foi classificado pelo IPMA como um tornado na escala F3 (escala de Fujita) e T6( escala de TORRO). A 17 de Novembro de 2012 a Este de Silves, mais precisamente em Málaga, houve relatos de um pequeno tornado às 10:04 UTC com registo de prejuízos associados a grande intensidade de chuva provocando inundações (Fonte: *European Severe Weather Database*).

O objetivo deste trabalho consiste na avaliação de grande parte dos parâmetros de instabilidade mais utilizados aplicados aos dois casos mencionados acima e assim determinar qual dos parâmetros de instabilidade identifica com maior eficácia este tipo de eventos meteorológicos. Teve-se como base de comparação os resultados obtidos por Viceto (2013) apesar da formulação de alguns índices ser diferente, adicionando alguns índices não calculados por Viceto (2013).

## 2.Estado de Arte

A investigação em relação a tornados ocorridos em Portugal e a sua “previsão” através de parâmetros de instabilidade é inexistente. No entanto, para o território vizinho já vão existindo trabalhos feitos. Como se sabe não existe uma regra básica que se aplique a todo o planeta sobre as causas e parâmetros que identifiquem os tornados. No entanto, para este trabalho vão-se comparar índices de instabilidade já desenvolvidos e assim determinar a eficácia dos mesmos na identificação dos dois tornados em estudo.

Edwards e Thompson (2000) sugeriram que o CAPE tem maior influência na ocorrência de tornados do que a helicidade para os 3 primeiros quilómetros, enquanto que valores elevados de helicidade e baixos valores de CAPE estão associados a ambientes com baixa probabilidade de ocorrência de tornados.

Desde o início, os estudos para tempestades do tipo supercélulas indicam que a existência de grande instabilidade e elevados valores de CAPE induzem o aumento da intensidade das correntes descendentes (Weisman and Klemp,1982,1984).

Sendo a magnitude do vento de corte bastante importante para a ocorrência de supercélulas, assim como a profundidade e a forma, o respetivo perfil do vento vertical tem um papel relevante no comportamento das tempestades convectivas. Em particular, para supercélulas com tornados e para sistemas duradouros de multicélulas, o vento de corte era importante para o primeiro a segundo quilómetro acima do solo (Evans e Doswell,2002).

McCaul e Weisman(1996) e Johns e Doswell(1992) verificaram que a grande maioria das supercélulas surgiam com valores de CAPE inferiores a  $1500 J/kg$ . Grant (1995) através de radiossondagens feitas na proximidade de tempestades verificou que o CAPE correspondia a cerca de  $700 J/Kg$ .

Rasmussen e Blanchard (1998) mostraram que o nível de convecção livre (LFC) para supercélulas com probabilidade de ocorrência de tornados era mais baixo (800 m) do que para supercélulas para as quais não existe probabilidade de ocorrência de tornados (1200 m).

Evans e Doswell (2001) encontraram valores de vento de corte para a camada 0-2 Km baixos na maioria dos casos a rondar os  $3-30 m/s$ . Estes valores foram encontrados em casos com fraco forçamento e elevados valores de CAPE.

Johns et al. (1990) e Davies-Jones et al. (1990) estabeleceram que à medida que a helicidade aumenta a intensidade do tornado também aumenta. Estes autores observam para a helicidade na camada 0-2 km valores na ordem dos  $360 m^2/s^2$  associados a tornados F2/F3

enquanto que para tornados violentos, F4/F5, os valores registados andam na ordem dos  $450 \text{ m}^2/\text{s}^2$ .

Weisman e Klemp (1982,1984) determinaram que ambientes com número de Richardson global (BRN)  $<50$  são favorecidos para o desenvolvimento de supercélulas, enquanto que para  $\text{BRN} > 35$  são favorecidas a ocorrência de multicélulas, sugerindo assim que podem surgir supercélulas e multicélulas em simultâneo. No entanto este parâmetro depende do CAPE. Para valores muito elevados de CAPE o BRN será também elevado, independentemente do denominador, BRN shear. No entanto, Johns et al. (1990) determinou através de 242 radiossondagens que 15% dos eventos com tornados tinham valores de  $\text{CAPE} \leq 1000 \text{ J/Kg}$  em que 47 % tinham o valor de  $\text{BRN} < 8$ . O BRN shear, foi mostrado por Stensrud et al. (1997), onde determinou que valores entre os  $40\text{-}100 \text{ m/s}$  estão normalmente associados a supercélulas com probabilidade de ocorrência de tornados.

A baixa altura do nível de condensação (LCL) para tempestades com elevada probabilidade de ocorrência de tornados suportada pela hipótese de Markowski et al.(2002) refere que o aumento da humidade nos baixos níveis contribui para o aumento da probabilidade de ocorrência de tornados.

Weisman e Klemp (1982), através de simulações num modelo de nuvens, assim como com estudos observados de Markowski et al (1998) e Bunkers(2000) indicam que valores de vento de corte de  $15\text{-}20 \text{ m/s}$  para os  $0\text{-}6\text{km}$  são necessários para suportar supercélulas.

### **3.Métodos e Dados**

#### **3.1.Modelo**

Para este trabalho foi necessário utilizar simulações provenientes do modelo numérico de previsão de tempo o WRF (versão 3.4.1), Weather Research and Forecasting (Skamarock et al.,2008). Este modelo foi desenvolvido para o estudo de fenómenos de microescala e de mesoescala, sendo também utilizado para a previsão do tempo em mesoescala.

O WRF é um modelo desenvolvido por diversas entidades ligadas à investigação, como o NCEP<sup>1</sup>,NCAR<sup>2</sup>,NOAA<sup>3</sup> entre outras, assim como com parcerias entre cientistas de várias universidades. Devido ao seu contínuo desenvolvimento e a sua facilidade de acesso (aberto a

---

<sup>1</sup> NCEP – National Centers for Environmental Prediction

<sup>2</sup> NCAR – National Center for Atmospheric Research

<sup>3</sup> NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

toda a comunidade e de forma gratuita) foi possível desenvolver um complemento do WRF com base em modelos antigos de modo a obter-se determinados parâmetros/índices atmosféricos de forma bastante simplificada e rápida, o ARW-WRF (Advanced Research WRF) tendo sido esta extensão bastante útil na realização deste trabalho.

O WRF utiliza coordenadas eta,  $\eta$ , determinadas através da seguinte expressão,

$$\eta = \frac{p(z) - p_t}{p(z=0) - p_t}$$

onde  $p(z)$  corresponde a pressão à altitude  $z$ ,  $p_t$  corresponde a pressão no topo da atmosfera do modelo e  $p(z=0)$  corresponde a pressão atmosférica à superfície (Skamarock et al., 2008).

A elevada capacidade de resolução do modelo quer para situações idealizadas ou reais com escalas horizontais a variar de alguns metros a milhares de quilómetros faz com que o modelo seja bastante utilizado na comunidade científica. No entanto, para se iniciar o processo de simulação é necessário introduzir no modelo as condições iniciais e de fronteira. Estes dados foram obtidos a partir do modelo global de previsão de tempo o GFS, *Global Forecasting System*, onde se utilizaram condições de fronteira laterais com um incremento temporal de 6h e com resolução horizontal de  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  para 27 níveis do modelo global.

Por fim, utilizou-se o GRADS (*Grid Analysis and Display System*) para calcular os parâmetros/índices a partir de variáveis simuladas pelo ARW-WRF e para a representação dos campos. Este software foi escolhido devido a sua capacidade de calcular variáveis derivadas a partir de variáveis de base que não são explicitamente calculadas pelo WRF.

### 3.2. Simulações

Após a identificação dos dias da ocorrência dos tornados procedeu-se às simulações considerando a fase de pré-formação do tornado, quer o de Silves a 16 de Novembro quer o de Málaga a 17 de Novembro, assim como a de dissipação deste fenómeno, ficando o período da simulação compreendido entre 15 de Novembro às 00h UTC<sup>4</sup> e 18 de Novembro às 00h UTC.

As simulações foram efetuadas para 4 domínios com diferentes resoluções assim como com diferentes períodos de amostragem dos dados simulados (tabela 1) para os 30 níveis.

---

<sup>4</sup> UTC – Coordinated Universal Time

Domínio	$\Delta x$ (km)	$\Delta t$ (horas)
1	25 x 25	3
2	5 x 5	1
3	1 x 1	1
4	1 x 1	1

**Tabela 1 - Espaçamento espacial do modelo e intervalo de amostragem dos dados de saída.**

Os domínios apresentam dimensões diferentes (figura 3) sendo que os domínios 3 e 4 representam o local da ocorrência dos tornados de modo mais ampliado. Contudo convém denotar o facto de o domínio de maior dimensões, domínio 1, conter todos os restantes domínios, domínios aninhados, e que os domínios aninhados interatuam com o domínio pai respetivo.



**Figura 3 –Domínios em estudo. Fonte : Google Earth.**

O domínio 1 é o domínio de maior extensão englobando grande parte da Península Ibérica incluindo algum território Francês e norte Africano assim como o oceano Atlântico ao largo da costa Portuguesa e parte do mar Mediterrâneo. Este domínio permitirá observar a progressão das estruturas que deram origem a ambos os tornados sobre o Oceano Atlântico.

O domínio 2 é mais restrito englobando apenas Portugal e um pouco do território Espanhol assim como o norte de Africa, sendo as dimensões inferiores ao domínio 1.

O domínio 3 restringe-se ao sul de Portugal e o sul de Espanha (pequena extensão), com este domínio pretende-se identificar o tornado e observar-se a sua evolução em relação aos parâmetros em estudo.

O domínio 4 apresenta o mesmo fundamento do domínio 3. Contudo, este representa a zona de Málaga, e em parte o mar Mediterrâneo envolvente, com o objetivo de identificar e estudar o tornado que ocorreu na zona.

Ferreira (2007) comparou um conjunto de parametrizações para território português determinando-se assim o melhor conjunto de parametrizações a utilizar nas simulações realizadas (tabela 2).

Parametrizações	Opções selecionadas
Radiação de grande comprimento de onda	rrtm scheme
Radiação de pequeno comprimento de onda	Dudhia scheme
Camada a superfície	Monin-Obukhov scheme
Solo	Noah land-surface model
Cúmulos	Grell-Devenyi ensemble scheme
Microfísica	WSM 6-class graupel scheme
Camada limite	YSU scheme

**Tabela 2 - Parametrizações utilizadas no WRF.**

### 3.3.Métodos

Para o cumprimento do objetivo proposto tornou-se necessário a elaboração de uma pesquisa com vista a selecionar de entre os parâmetros existentes qual melhor se enquadraria para a identificação dos tornados, quer o de Silves quer o de Málaga. Após uma elaborada pesquisa reuniu-se um vasto conjunto de parâmetros que serão sub-divididos entre índices termodinâmicos, índices de instabilidade dinâmica e índices compostos.

#### 3.3.1. Índices termodinâmicos

##### 3.3.1.1. CAPE

O CAPE, energia potencial disponível para convecção, é utilizado para avaliar movimentos convectivos e este é definido como (Stull, 2000),

$$CAPE = \sum \frac{|g|}{T_e} (T_p - T_e) \times \Delta z$$

onde  $T_p$  corresponde à temperatura da parcela de ar,  $T_e$  à temperatura do ar do meio envolvente,  $g$  corresponde à aceleração gravítica e  $\Delta z$  à variação de  $z$ . Para valores elevados de CAPE maior será a probabilidade de ocorrência de fortes movimentos ascendentes associados a forte convecção. Isto dá-se devido a diferença da temperatura da parcela de ar com o da temperatura do meio envolvente, provocando instabilidade localizada que induzirá movimentos convectivos de modo a se restabelecer o equilíbrio (tabela 3). No entanto, há ocorrência de tornados com baixos valores de CAPE (Aran et al., 2009), o que indica que elevados valores de CAPE nem sempre são obrigatórios para a ocorrência destes fenómenos.

Valores CAPE ( $J/kg$ )	Características do ambiente
0	Estável
0-1000	Marginalmente instável
1000-2500	Moderadamente instável
2500-3500	Muito instável
>3500	Extramente instável

**Tabela 3 - Valores padrão do CAPE que caracterizam o ambiente (Fonte: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/>).**

Posteriormente determinou-se o *mlCAPE*, o *muCAPE* e o *sbCAPE*.

O *mlCAPE*, *Mixed Layer CAPE*, representa a média de energia potencial disponível para convecção para elevar uma parcela de ar com temperatura igual à temperatura média da camada dos primeiros 100 hPa a contar da superfície, até ao *LFC*, não correspondendo este CAPE ao CAPE máximo. Este CAPE tem como limitação o facto de o valor médio não corresponder ao valor máximo.

O *muCAPE*, *Must Instable CAPE*, representa a energia potencial disponível para convecção que a parcela mais instável nas primeiros 300hPa da atmosfera eleva até ao *LFC* (Thompson et al.,2003). Sendo o valor máximo de CAPE obtido.

O *sbCAPE*, *Surface Based CAPE*, representa a energia potencial disponível para convecção para elevar uma parcela da superfície até ao *LFC*.

### 3.3.1.2. CIN

O CIN, índice de inibição de convecção, indica a quantidade de energia necessária para elevar uma parcela de ar até ao nível de *LFC*, sendo este determinado da seguinte forma,

$$CIN = - \int_{p_i}^{p_f} R_d (T_{vp} - T_{vr}) d \ln P$$



onde  $R_d$  corresponde à constante específica para o ar seco,  $T_{vp}$  corresponde à temperatura virtual da parcela de ar que se movimenta e a  $T_{vr}$  a temperatura virtual do meio envolvente (AMS,2011). Para valores de  $CIN$  superiores a  $200 J/kg$  há uma forte inibição dos movimentos convectivos havendo assim menor probabilidade de ocorrência de tempestades. Do mesmo modo que existem diferentes  $CAPE$  também existem o  $mlCIN$ ,  $sbCIN$  e  $muCIN$ , sendo estes determinados para os mesmos níveis.

### **3.3.1.3. Água precipitável**

A quantidade de água precipitável é um parâmetro bastante útil para identificar ambientes favoráveis a ocorrência de tornados. Este parâmetro quantifica a quantidade de vapor de água (em  $mm$ ) contida numa coluna de ar de secção unitária que vai desde a superfície até ao topo da atmosfera ( $P = 0 hPa$ ). Segundo Varmaghani (2011) a água precipitável é dada pela seguinte equação,

$$\text{Água Precipitável} = \int_{Z=0}^Z \rho_v dz$$

onde  $\rho_v$  corresponde à humidade absoluta e esta será calculada a partir da superfície,  $Z = 0$ , até a uma altura  $Z$ , que no nosso caso corresponde ao nível de  $P = 0 hPa$ .

### **3.3.1.4. Índice K**

O índice K é um índice que quantifica também a estabilidade estática e baseia-se no gradiente vertical de temperatura na baixa/média troposfera, no conteúdo de vapor de água nos níveis baixos e na extensão vertical do vapor de água. Este parâmetro obtém-se do seguinte modo,

$$K = T_{850} - T_{500} + T_{d850} - T_{d700} + T_{d700}$$

onde  $T$  corresponde a temperatura, em  $^{\circ}C$ , nos respetivos níveis (aos  $850 hPa$ , aos  $500 hPa$  e aos  $700 hPa$ ) e  $T_d$  corresponde a temperatura do ponto de orvalho, em  $^{\circ}C$ , nos respetivos níveis (aos  $850 hPa$  e aos  $700 hPa$ ). Não sendo usualmente utilizado para a “previsão” de tempestades severas, contudo, para valores de  $K > 30$  existe elevada probabilidade de ocorrência de tempestades (tabela 4).

Índice K	Cenários Possíveis
15 < K < 25	Potencial convectivo pequeno
26 < K < 39	Potencial convectivo moderado
K > 40	Elevado potencial convectivo

Tabela 4 - Valores padrão para o índice K (Fonte: <http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/>).

#### 3.3.1.5. Índice VT

O índice VT (*vertical totals*) é o índice utilizado para identificar tempos severos. No entanto, este índice raramente é utilizado de forma singular, mas sim utilizado em parceria com o CT (*cross totals*) que em conjunto formam o TT (*total totals*). Estes últimos índices serão explicados nas subsecções seguintes. O índice VT é determinado do seguinte modo,

$$VT = T_{850} - T_{500}$$

onde T corresponde à temperatura em °C nos respetivos níveis de pressão,  $P = 850 \text{ hPa}$  e a  $P = 500 \text{ hPa}$ . Para este índice, valores superiores a 26 indicam um forte potencial para a ocorrência de tempestades.

#### 3.3.1.6. Índice CT

O índice CT é utilizado também para identificar tempestades mas, assim como o VT, é raramente utilizado individualmente, sendo determinado da seguinte forma,

$$CT = T_{d850} - T_{500}$$

onde  $T_d$  corresponde à temperatura do ponto de orvalho aos  $850 \text{ hPa}$  e  $T$  corresponde à temperatura aos  $500 \text{ hPa}$ , ambas em °C. A tabela 5 indica os valores de referência observados e as possíveis interpretações.

Valor de CT	Potencial de ocorrência de tempestades
18-19	Possibilidade de ocorrência de tempestades isoladas
20-21	Possibilidade de ocorrência de tempestades podendo ocorrer algumas mais intensas.
22- 23	Possibilidade de ocorrência de tempestades podendo ocorrer algumas mais severas
24-25	Possibilidade de ocorrência de tempestades severas com ocorrência de tornados isolados
26-29	Numerosas tempestades severas com ocorrência de alguns tornados
>29	Numerosas tempestades severas associadas a elevada precipitação com ocorrência de fortes tornados

Tabela 5- Valores de referência para CT

(Fonte: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/>).

### 3.3.1.7. Índice TT

O índice TT (*total totals*) é o índice utilizado para identificar tempos severos, onde a valores elevados de TT está associada a instabilidade vertical existente na atmosfera, e determina-se do seguinte modo,

$$TT = T_{850} + T_{d850} - 2 * T_{500} = VT + CT$$

onde  $T$  corresponde à temperatura nos respectivos níveis de pressão (aos 850 hPa e aos 500 hPa) e  $T_d$  corresponde à temperatura no ponto de orvalho a  $P = 850$  hPa . A tabela 6 demonstra os valores característicos deste índice.

Valor de TT	Potencial de ocorrência de tempestades
TT<44	Fraca convecção
44<TT<49	Ocorrência de tempestades
50<TT<54	Tempestades severas isoladas
TT>55	Elevada probabilidade de desenvolvimento de tempestades severas com ocorrência de tornados

**Tabela 6 - Valores de referência e possíveis observações (Fonte: <http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/>).**

### 3.3.1.8. Índice LI

O índice LI (*lifted index*) corresponde ao índice de ascensão que corresponde a uma medida de instabilidade latente, sendo determinado da seguinte forma,

$$LI = (T_{amb} - T_{par})_{500}$$

onde  $T_{amb}$  corresponde à temperatura da atmosfera aos 500 hPa e  $T_{par}$  corresponde à temperatura da parcela de ar aos 500 hPa que sobe adiabaticamente desde a superfície até aos 500 hPa. A tabela 7 mostra os valores de referência e as respectivas observações.

Valores de LI	Potencial de ocorrência de tempestades
LI>2	Sem atividade convectiva
0<LI<2	Probabilidade de ocorrência de precipitação, tempestades isoladas possíveis.
-2<LI<0	Probabilidade de tempestades
-4<LI<-2	Possibilidade de tempestades severas.
LI<-4	Probabilidade de tempestades severas com possibilidade de ocorrência de tornados.

**Tabela 7- Valores padrão para LI (Fonte: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/>).**

### 3.3.2. Índices de instabilidade dinâmica

#### 3.3.2.1. *BRN shear*

O número de Richardson global de corte (BRN shear) demonstrou de forma eficaz a ocorrência de supercélulas (Thompson et al., 2003) sendo este parâmetro obtido através da seguinte equação,

$$BRN\ shear = \frac{1}{2}(\bar{u}^2 + \bar{v}^2)$$

onde  $\bar{u}$  ( $\bar{v}$ ) corresponde à magnitude da componente W-E (N-S) do vector diferença do vento médio entre 0-6 km e o vento médio aos 0-500 m. Valores de BRN shear entre 40-100  $m^2/s^2$  indicam elevada probabilidade de ocorrência de supercélulas com tornados, enquanto que para valores inferiores a 40  $m^2/s^2$  existe a possibilidade de ocorrência de tempestades (Stensrud et al., 1997).

#### 3.3.2.2. *Helicidade(SRH)*

A helicidade relativa à tempestade, SRH (storm relative helicity), é um parâmetro muito utilizado na identificação de supercélulas sendo deste modo bastante útil de utilizar, sendo determinado a partir de:

$$SRH = - \int_0^z \hat{k} \cdot (\vec{V} - \vec{C}) \times \frac{\partial \vec{V}}{\partial z'} dz'$$

onde  $\vec{V}$  corresponde ao vector horizontal do vento,  $\vec{C}$  ao vector do movimento da tempestade,  $z'$  a altura a partir do solo e  $z$  tem o valor de 1 ou de 3 km (determinou-se para os 0-1km e para os 0-3km) sendo o índice calculado para estas altitudes. A quantidade de SRH está relacionada com a propagação da tempestade através do cisalhamento, onde este cisalhamento está associado à componente velocidade da tempestade que é perpendicular ao vector do vento de corte para as referidas camadas (Rotunno, 1981).

Para valores superiores a 150  $m^2/sec^2$  há uma forte indicação de ambientes associados a supercélulas convectivas de longa duração com turbilhões intensos com capacidade para a produção de tornados.

### 3.3.2.3. Vento de corte

O vento de corte, *BWD*, é fundamental para a ocorrência de convecção (Van Der Val, 2007). Este parâmetro corresponde à alteração quer da intensidade quer da direção do vento horizontal em altitude. Neste trabalho determinou o vento de corte para a camada 0-6 km e para a camada 0-1km, onde, para o vento a superfície, utilizou-se o vento aos 10 metros.

Vento de Corte ( <i>m/s</i> )	Intensidade
0<BWD<3	Fraco
4<BWD<5	Moderado
6<BWD<8	Intenso
BWD>8	Severo

Tabela 8 - Valores do vento de corte e respetiva intensidade (Fonte: <http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/>).

### 3.3.3. Índices Compostos

#### 3.3.3.1. BRN

Posteriormente, procedeu-se à determinação do BRN que, em comparação com o BRN shear, permite determinar a relação da estabilidade vertical e o vento de corte, sendo definido como:

$$BRN = \frac{\mu CAPE}{BRN\ shear}$$

Valores de BRN são associados a ambientes instáveis e/ou ambientes com fracos ventos de corte enquanto que baixos valores de BRN indicam fraca instabilidade e/ou ambientes com elevados ventos de corte. De modo geral, valores compreendidos de 15-40 são favoráveis a ocorrência de supercélulas, para valores superiores a 40 as multicélulas encontram-se favorecidas.

### 3.3.3.2. SWEAT

O *SWEAT* (Severe Weather Threat Index) permite, através de diferentes variáveis, identificar condições favoráveis para a ocorrência de tempestades e tornados. Este índice é determinado do seguinte modo:

$$SWEAT = 12 T_{d850} + 20 (TT - 49) + 2f_{850} + f_{500} + 125 (s + 0.2)$$

Sendo,

$$s = \sin(d_{500} - d_{850})$$

onde  $T_{d850}$  corresponde à temperatura do ponto de orvalho aos 850 *hPa*, em °C,  $TT$  ao índice  $TT$  (referido anteriormente),  $f_{850}$  e  $f_{500}$  corresponde à velocidade, em nós, aos 850 *hPa* e aos 500 *hPa* respetivamente, e  $d_{500}$  e  $d_{850}$  corresponde à direção do vento aos 500 *hPa* e aos 850 *hPa*. Para valores superiores a 400 existe elevada probabilidade de se verificar tempestades severas com ocorrência de tornados.

Índice SWEAT	Tipo de tempestade
<b>SWEAT &lt; 300</b>	Não há ocorrência de tempestades
<b>300 &lt; SWEAT &lt; 400</b>	Possibilidade de ocorrência de tempestades severas
<b>SWEAT &gt; 400</b>	Elevada possibilidade de ocorrência de tempestades severas incluindo possibilidade de ocorrência de tornados

Tabela 9 - Valores padrão para SWEAT (Fonte: <http://www.spc.noaa.gov/exper/mesoanalysis/>).

### 3.3.3.3. SCP

O SCP, *supercell composite parameter*, foi desenvolvido com o intuito de identificar ambientes com elevada probabilidade de ocorrência de supercélulas. O SCP foi desenvolvido para normalizar os valores de CAPE assim como os valores do vento de corte vertical para valores de ambientes de supercélulas obtendo-se o seguinte parâmetro adimensional (Thompson et al., 2003),

$$SCP = \left( \frac{\mu CAPE}{1000} \right) \times \left( \frac{0 - 3kmSRH}{100} \right) \times \left( \frac{BRN\ shear}{40} \right)$$

onde  $\mu CAPE$  corresponde ao valor de  $CAPE$  máximo (“*most unstable*”) nos primeiros 300 hPa a partir da superfície, em  $J/kg$ ,  $srh3km$  corresponde à helicidade relativa da tempestade para os primeiros 3 Km junto à superfície, em  $m^2/s^2$ , e por fim o  $BRN\ shear$ . Valores de  $SCP > 1$  verificam-se associados a ambientes com supercélulas enquanto que para  $SCP < 1$  verifica-se a existência de ambientes não favoráveis ao desenvolvimento de supercélulas. No entanto, não há um valor fixo para determinar a possibilidade de ocorrência de tornados. Para valores superiores a  $SCP > 2.3$  há probabilidade de ocorrência de tornados (Thompson et al., 2003).

### 3.3.3.4. CSSP

O índice CSSP, Craven *Significant Severe Composite*, é obtido pelo produto do  $mlCAPE$  com o vento de corte dos 0-6 km. Este parâmetro quantifica a instabilidade estática e o vento de corte. Usualmente valores superiores a  $20000\ m^3/s^3$  estão associados a eventos severos incluindo fortes tornados (Craven et al., 2002).

$$CSSP = mlCAPE * 0 - 6kmSRH$$

onde  $0 - 6kmSRH$  corresponde ao vento de corte para os 6 primeiros quilômetros da atmosfera, em  $m/s$  e o  $mlCAPE$  (definido anteriormente) em  $J/kg$ .



### 3.3.3.5. STP

O índice STP , *Significant Tornado Parameter*, foi desenvolvido para diferenciar entre supercélulas com probabilidade de ocorrência de tornados de supercélulas sem probabilidade de ocorrência de tornados (Thompson et al, 2003). No entanto, existem várias reformulações deste índice. Este índice, adimensional, resulta da junção do *mlCAPE* (em  $J/kg$ ), do *LCL* (em  $m$ ) e do vento de corte (em  $m/s$ ) para os 6 primeiros quilómetros da atmosfera e helicidade para o primeiro quilómetro da atmosfera (*SRH*) ,em  $m^2/s^2$  (Thompson et al, 2003), e é dado por,

$$STP = \left( \frac{mlCAPE}{1500} \right) \times \left( \frac{0 - 6BWD}{20} \right) \times \left( \frac{0 - 1SRH}{100} \right) \times \left[ \frac{(2000 - LCL)}{1500} \right]$$

Outra formulação encontrada é a seguinte,

$$STP = \left( \frac{sbCAPE}{1500} \right) \times \left( \frac{0 - 6BWD}{20} \right) \times \left( \frac{0 - 1SRH}{150} \right) \times \left[ \frac{(2000 - LCL)}{1000} \right]$$

Onde, comparativamente à equação anterior, o *mlCAPE* foi substituído pelo *sbCAPE* , em  $J/kg$  (Thompson et al., 2003). E por fim, sendo que esta formulação (Van der Velde, 2007) comparativamente às anteriores considera o *CIN* (em  $J/kg$ ),

$$STP = \left( \frac{mCAPE}{1000} \right) \times \left( \frac{0 - 6BWD}{20} \right) \times \left( \frac{0 - 1BWD}{10} \right) \times \left[ \frac{(2000 - LCL)}{1500} \right] \times \left[ \frac{(150 - CIN)}{125} \right]$$

onde  $0 - 6BWD$  corresponde ao vento de corte para os primeiros 6 km (em  $m/s$ ) e  $0 - 1BWD$  corresponde ao vento de corte para o primeiro quilómetro da atmosfera (em  $m/s$ ).

Independentemente das formulações, para valores de STP superiores a 1 existe probabilidade de ocorrência de supercélulas.

### 3.3.3.6. EHI

O índice EHI, *Energy-Helicity index*, foi desenvolvido para identificar o potencial para a ocorrência de tornados (Thompson et al, 2003) combinando o *CAPE* com a helicidade. No entanto, a formulação inicial (Hart and Korotky, 1991), utilizava o *CAPE* total e a helicidade para os 3 primeiros quilômetros. Posteriormente, Rasmussen (2003) demonstrou que considerando apenas a helicidade para o primeiro quilômetro da atmosfera com o *mlCAPE* havia uma melhor discriminação entre supercélulas com tendência para a formação de tornados com supercélulas sem essa tendência. Deste modo utilizou-se a seguinte formulação (Rasmussen,2003),

$$EHI = \frac{(mlCAPE * 0 - 1SRH)}{160000}$$

onde *mlCAPE* vem em  $J/kg$  e a helicidade para o primeiro quilometro ,  $0 - 1SRH$ , vem em  $m^2/s^2$ . No entanto, também determinou-se o EHI utilizando a helicidade para os três primeiros quilômetros,  $0 - 3SRH$ , vem em  $m^2/s^2$ , de modo a se comparar.

Valores de EHI	Observações possíveis
0 < EHI < 0.34	Possível ocorrência de uma tempestade
0.20 < EHI < 1.46	Possibilidade de ocorrência de supercélulas com possibilidade de ocorrência de fracos tornados
0.42 < EHI < 2.87	Possibilidade de ocorrência de supercélulas com possibilidade de ocorrência de fortes tornados

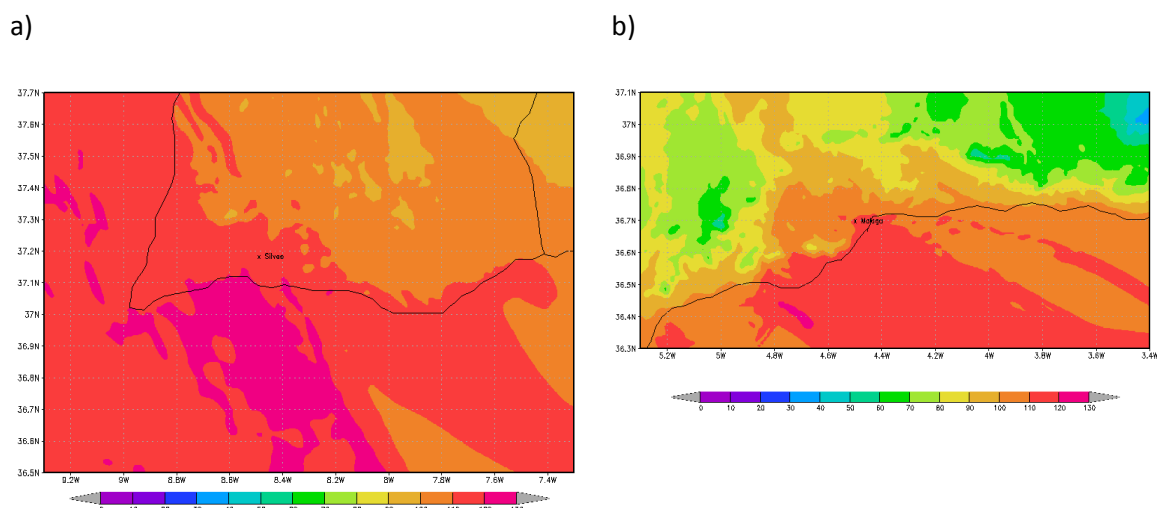
Tabela 10 - Valores de EHI com possíveis observações (Fonte: <http://www.theweatherprediction.com/severe/indices/>).

## 4. Análise e discussão dos resultados

Nesta secção será feita a exposição de alguns dos resultados obtidos assim como a respetiva análise.

O tornado de Silves ocorrido a 16 de Novembro de 2012 foi classificado numa escala de F3/T6 (escala de Fujita e TORRO, respetivamente), com ventos de aproximadamente 256-295 km/h apresentando uma extensão de cerca de 38 km dos quais 7 km foram percorridos sobre água, apresentando uma largura de 100 a 300 m (relatório IPMA), sendo considerado um tornado moderadamente devastador (escala de TORRO) ou forte (escala de Fujita).

O tornado ocorrido em Málaga a 17 de Novembro de 2012 não foi tão intenso quanto o de Silves e teve origem nas mesmas estruturas convectivas que deram origem ao tornado de Silves. A este tornado foi associado grande quantidade de precipitação, cerca de 250 mm em 20 minutos, onde se registou uma velocidade máxima de rajada na ordem dos 57.4 km/h, aeroporto internacional de Málaga.

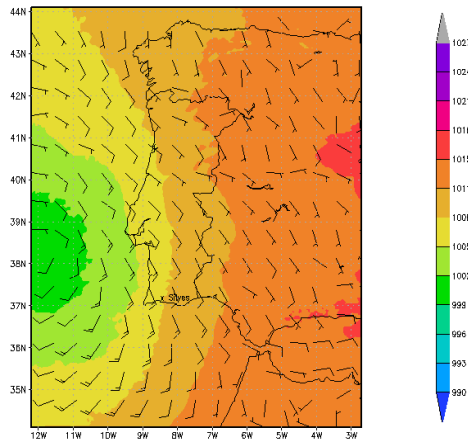


**Figura 4- Água Precipitável (em mm) para Silves às 13h do dia 16/11/2012 a), e para Málaga às 11h do dia 17/11/2012 b).**

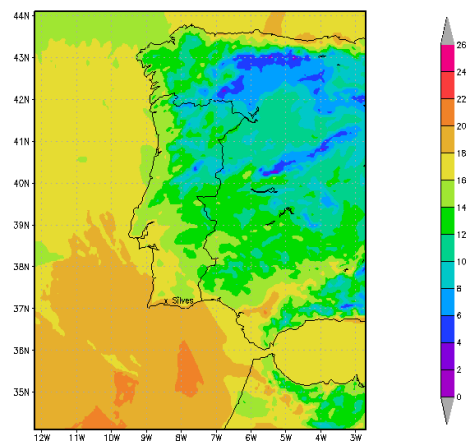
Nos campos de água precipitável (figura 4), verifica-se máximos na ordem dos 110-120mm quer para Silves quer para Málaga.

Primeiramente fez-se a identificação das condições meteorológicas que deram origem a ocorrência destes tornados. Para isso representaram-se os campos de pressão e vento à superfície assim como da temperatura à superfície (figura 5).

a)



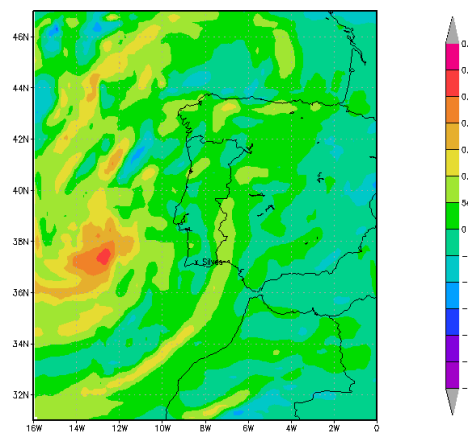
b)



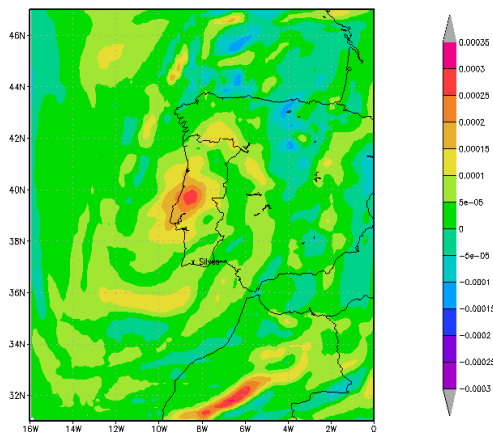
**Figura 5- Campos de a) pressão (hPa) e vento a superfície (m/s) para às 14h do dia 16/11/2012 e b) a temperatura a 2m (°C) para as 10h do dia 16/11/2012.**

Observa-se um deslocamento de um centro de baixas pressões para noroeste em direção a Lisboa, havendo a rotação do vento acompanhando as isóbaras. Observando o campo obtido para a temperatura verifica-se a existência de uma frente quente proveniente de Sudoeste a deslocar-se em direção a Noroeste algumas horas antes da ocorrência dos tornados sendo esta responsável pela instabilidade que deu origem ao tornado de Silves e que posteriormente originou o tornado de Málaga. Posteriormente determinou-se os campos de vorticidade aos 500hPa com o intuito de observar zonas de divergência e convergência de massas de ar (Figura 6).

a)



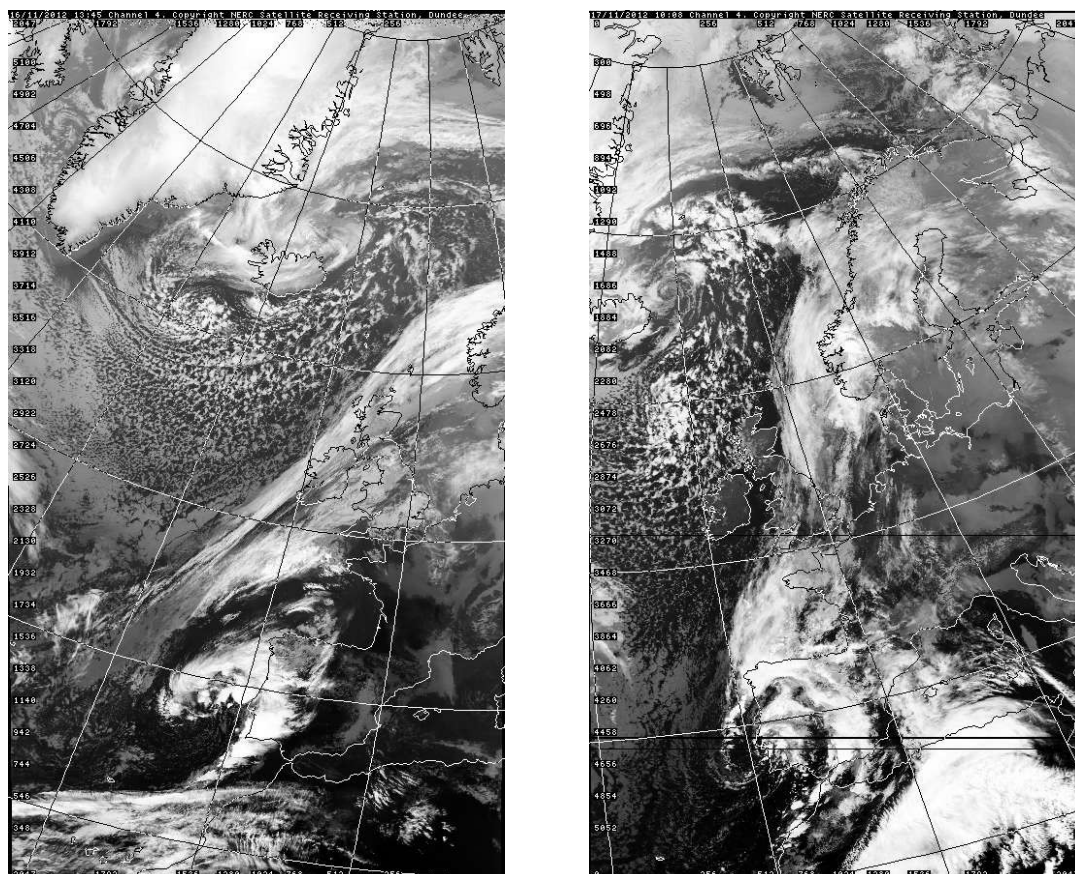
b)



**Figura 6 - Campo da a) vorticidade( $s^{-1}$ ) aos 500hPa para as 12h do dia 16/11/2012 e b) vorticidade( $s^{-1}$ ) aos 500hPa para o dia 17/12/2012 às 9h.**

Observando o campo obtido para a vorticidade as 12h verifica-se que sobre a zona de Silves a vorticidade é negativa significando que junto a superfície ocorre convergência do ar havendo divergência em altitude aumentando assim as condições favoráveis para a ocorrência de instabilidade. O mesmo se verifica para a zona de Málaga no dia 17 às 9h.

Recorreu-se também a imagens de satélite que demonstram a fisionomia da tempestade e o respetivo deslocamento da massa de ar frio sendo este identificado pelo vapor de água observado (figura 7).



**Figura 7- Imagens de satélite AVHRR (NOAA) no infravermelho, no canal 4. As áreas onde o vapor de água são superiores encontram-se a branco. A imagem da esquerda corresponde ao dia 16/11/2012 às 13h45 e a imagem da direita corresponde ao dia 17/11/2012 às 10h08. Fonte : NERC Satellite Receiving Station, Dundee.**

Ao observar as imagens do vapor de água verifica-se a existência do gancho característico na ocorrência de tornados, verificando-se que a estrutura que deu origem aos tornados foi a mesma e que houve um transporte desta que se deslocou de Oeste para Este. Na análise dos skew-T verifica-se que ocorre em altura uma rotação do vento em sentido horário (figura 8),

havendo a existência do *veering* característico para ocorrência de tempo severo, sendo este mais evidente para Málaga.

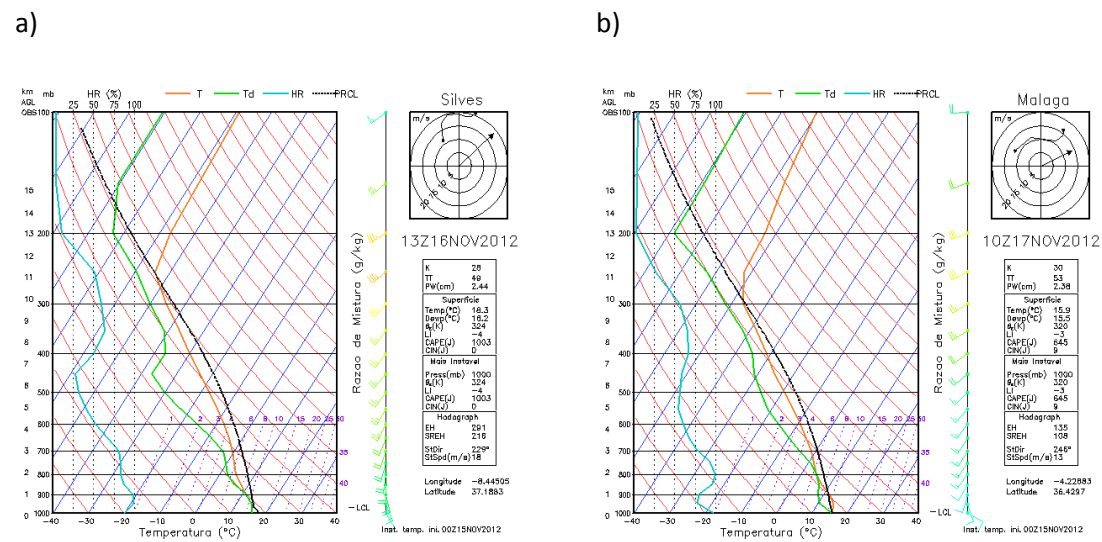


Figura 8- Skew-T obtido para Silves às 13h do 16/11/2012 em a). Skew-T obtido para Málaga às 10h do 17/11/2012.

Nas subsecções seguintes serão analisadas os diferentes conjuntos de índices determinados.

### 4.1. Índices termodinâmicos

Para facilitar a análise os índices serão colocados numa tabela (tabela 11).

Índice	Valor Referência		Tornado Silves	Tornado Málaga
<b>mlCAPE(J/kg)</b>	0	Estável	600 a 1000	200 a 400
	0-1000	Marginalmente instável		
	1000-2500	Moderadamente instável		
	2500-3500	Muito instável		

	>3500	Extramente instável			
sbCAPE(J/kg)	0	Estável	800 a 1400		200 a 600
	0-1000	Marginalmente instável			
	1000-2500	Moderadamente instável			
	2500-3500	Muito instável			
	>3500	Extramente instável			
muCAPE(J/kg)	0	Estável	800 a 1200		200 a 600
	0-1000	Marginalmente instável			
	1000-2500	Moderadamente instável			
	2500-3500	Muito instável			
	>3500	Extramente instável			
mlCIN(J/kg)	>200 fraca possibilidade de ocorrência de tornados		0 a 20	0 a 20	
sbCIN(J/kg)	>200 fraca possibilidade de ocorrência de tornados		0 a 20	0 a 20	
muCIN(J/kg)	>200 fraca possibilidade de ocorrência de tornados		0 a 20	0 a 20	
Água Precipitável(mm)	Não existe um valor padrão		110 a 120	100 a 120	
K	15 <K < 25	Potencial convectivo pequeno	20 a 40	25 a 35	
	26 < K < 39	Potencial convectivo			

		moderado			
	K > 40	Elevado	potencial convectivo		
<b>VT</b>	>26	forte potencial para a ocorrência de tempestades		<b>28 a 30</b>	<b>28 a 30</b>
<b>CT</b>	18-19	Possibilidade de ocorrência de tempestades isoladas		<b>24 a 27</b>	<b>27 a 30</b>
	20-21	Possibilidade de ocorrência de tempestades podendo ocorrer algumas mais intensas.			
	22- 23	Possibilidade de ocorrência de tempestades podendo ocorrer algumas mais severas			
	24-25	Possibilidade de ocorrência de tempestades severas com ocorrência de tornados isolados			
	26-29	Numerosas tempestades severas com ocorrência de alguns tornados			



	>29	Numerosas tempestades severas associadas a elevada precipitação com ocorrência de fortes tornados		
<b>TT</b>	TT<44	Fraca convecção	52 a 55	<b>54 a 58</b>
	44<TT<49	Ocorrência de tempestades		
	50<TT<54	Tempestades severas isoladas		
	TT>55	Elevada prob. de desenvolvimento de tempestades severas com ocorrência de tornados		
<b>LI</b>	LI>2	Sem atividade convectiva	-4 a -2	-3 a -4
	0<LI<2	Probabilidade de ocorrência de precipitação, tempestades isoladas possíveis.		
	-2<LI<0	Probabilidade de tempestades		
	-4<LI<-2	Possibilidade de tempestades severas.		
	LI<-4	Prob. de tempestades		

---

severas	com
possibilidade	de
tornados.	

---

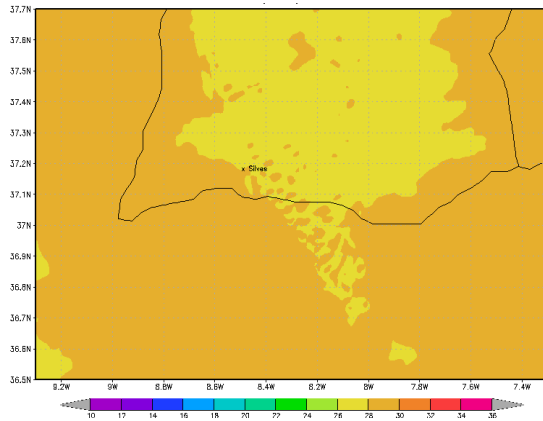
**Tabela 11- Valores dos índices termodinâmicos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4.**

A tabela 11 mostra que nem todos os parâmetros identificam as condições favoráveis para a ocorrência de tornados. Comparando com os resultados obtidos por Viceto (2013), verifica-se diferenças em praticamente todos os índices termodinâmicos calculados em comum, verificando-se valores inferiores em quase todos os índices. Neste trabalho obteve-se conjuntos de índices termodinâmicos que identificam de forma positiva os ambientes favoráveis para a ocorrência de tornados.

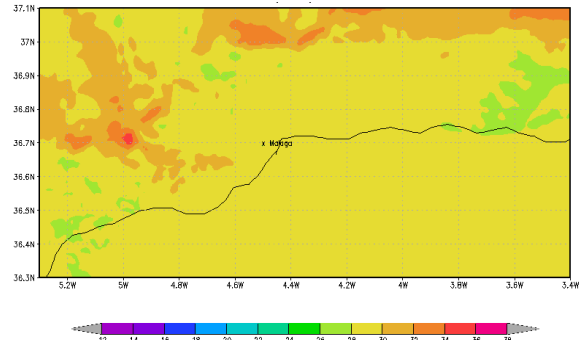
Os valores obtidos para o índice CIN, independentemente do tipo de CIN, indicam a falta de inibição para a ocorrência de movimentos convectivos, demonstrando que os movimentos verticais verificados na presença de supercélulas encontram-se favorecidos (imagens não mostradas).

O índice VT, *vertical totals*, demonstrou a presença de ambiente favorável para ocorrência de tempestades (figura 9), assim como o índice CT (figura 10), *cross totals*, que indica a presença de ambiente favorável para a ocorrência de alguns tornados podendo possivelmente gerar-se fortes tornados, sendo estes dois índices não calculados pela colega demonstrando ser uma mais valia para identificar os ambientes favoráveis à ocorrência dos tornados.

a)

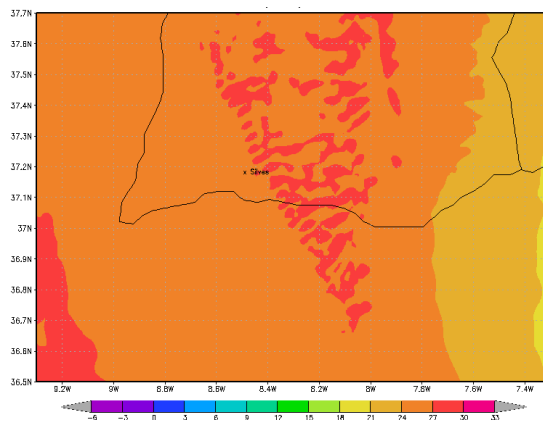


b)

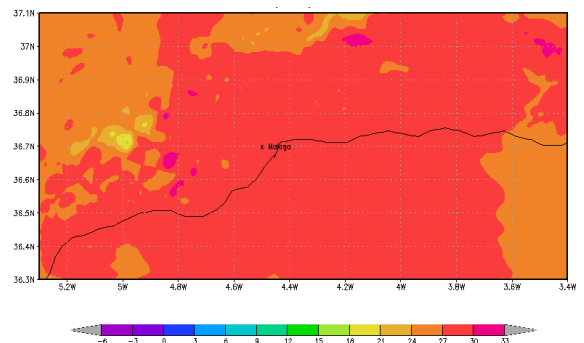


**Figura 9- Campo do índice VT para o domínio 3, em que em a) representa a 16/11/2012 às 14h. A imagem b) corresponde ao campo VT para o domínio 4, em Málaga, às 11h do dia 17/11/2012.**

a)



b)



**Figura 10- Campo do índice CT para o domínio 3, em que em a) representa a 16/11/2012 às 14h. A imagem b) corresponde ao campo CT para o domínio 4, em Málaga, às 11h do dia 17/11/2012.**

No entanto, o índice TT que é determinado pela junção do índice VT e CT apenas apresenta valores favoráveis para a ocorrência de tornados no caso de Málaga, onde nesta situação há indicação da possibilidade da ocorrência de tempestades severas (imagens não

mostradas). Viceto (2013) não obteve valores que referissem existência de ambiente favorável para a ocorrência dos tornados, independentemente do local.

Os seguintes índices não apresentaram as condições mais favoráveis, os valores mais elevados, para a instabilidade necessária para a ocorrência dos respetivos tornados. No entanto, os valores obtidos são elevados e indiciam a existência de ocorrência de instabilidade que poderá ser a necessária para a ocorrência dos tornados tendo estes ocorridos na realidade. Exemplo disso é o índice K, este índice indica a existência de potencial convectivo moderado para ambos os locais (imagens não mostradas). Viceto (2013) obteve para o índice K baixos valores indiciando potencial convectivo reduzido para ambos os tornados, contrastando com os valores obtidos neste trabalho que evidenciam potencial convectivo moderado. Outro exemplo de um índice não calculado por Viceto (2013) e que demonstra alguma eficácia na deteção de ambientes favoráveis à ocorrência de tornados é o índice LI (imagens não mostradas), que demonstrou a possibilidade de ocorrência de tempestades severas. Contudo, houve índices que apresentaram valores elevados para apenas um dos locais, como o índice TT já referido anteriormente e o CAPE, independentemente do tipo (imagens não mostradas). Observando os valores de CAPE obtidos verifica-se que estes, apesar de não serem elevados, indicam a presença de instabilidade, observando-se os valores mais elevados para o tornado de Silves, verificando-se o máximo valor para o sbCAPE, sendo este CAPE calculado à superfície.

Seguidamente irá fazer-se a análise dos índices de instabilidade dinâmica.

## 4.2. Índice de instabilidade dinâmica

Do mesmo modo que se apresentou na subsecção anterior o mesmo será apresentado para os índices de instabilidade dinâmica (tabela 12).

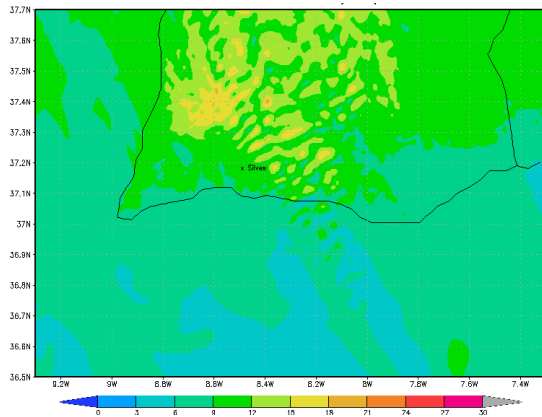
Índice	Valor de Referência	Tornado de Silves	Tornado de Málaga
<b>BRN shear (<math>m^2/s^2</math>)</b>	40< BRN shear <100	24 a 32	<b>60 a 75</b>
	elevada probabilidade de ocorrência de supercélulas com tornados		

	<40 a possibilidade de ocorrência de tempestades				
<b>Helicidade (<math>m^2/s^2</math>)</b>	Helicidade> 150	forte	<b>0-1 km:80 a 220</b>	<b>0-1 km:220 a 290</b>	
	probabilidade de ocorrência de supercélulas com ocorrência de tornados		0-3 km:80 a 150	<b>0-3 km:290 a 360</b>	
<b>Vento de corte , BWD, (<math>m/s</math>)</b>	0<BWD<3	Fraco	<b>0-1 km: 9 a 12</b>	<b>0-1 km:6 a 12</b>	
	4<BWD<5	Moderado			
	6<BWD<8	Intenso	<b>1-6 km:20 a 24</b>	<b>1-6 km: 20 a 28</b>	
	BWD>8	Severo			

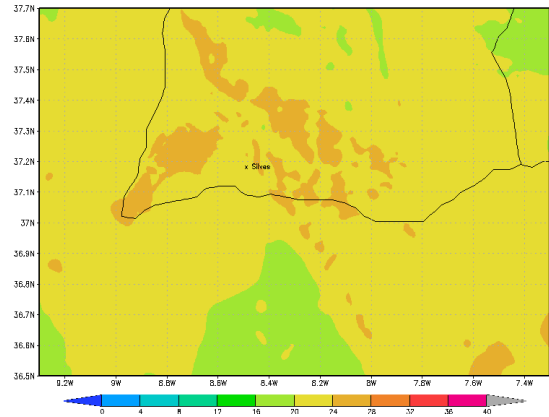
**Tabela 12- Valores dos índices dinâmicos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4.**

Analisando a tabela verifica-se que o vento de corte obtido foi classificado como intenso, verificando-se os valores máximos obtidos para os primeiros 6km na ordem dos 24 m/s (86 km/h) para Silves e de 28 m/s (101 km/h) para Málaga, para o primeiro quilómetro o máximo obtido foi de 12 m/s (43 km/h) para ambos os locais (Figura 11).

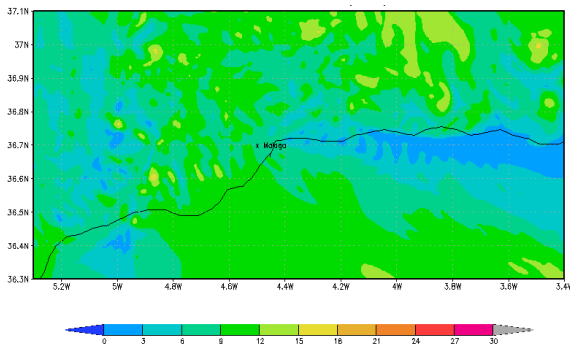
a)



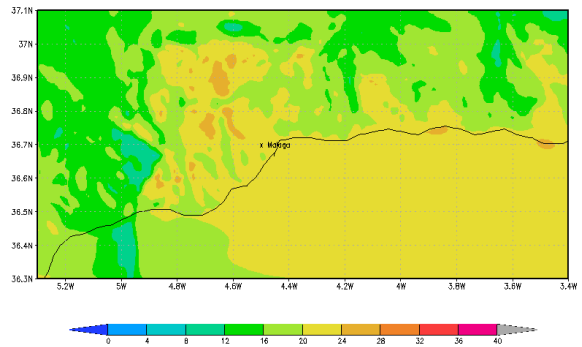
b)



c)



d)



**Figura 11- Vento de corte (m/s) para o primeiro quilómetro para o instante 16/11/2012 às 14h em Silves a).Para o mesma camada mas para o instante 17/11/2012 as 10h c) para Málaga. Vento de corte (m/s) para os primeiros 6 km para o instante 16/11/2012 às 14h em Silves b).Para a mesma camada mas para o instante 17/11/2012 às 10h d) para Málaga.**

Independentemente do domínio e da camada do vento de corte calculada verifica-se ao analisar os campos acima que os valores máximos do vento de corte nunca estão localizados no local da ocorrência dos tornados. Os valores obtidos para a helicidade para o primeiro quilómetro indicam probabilidade de ocorrência de supercélulas com presença de tornados, no entanto para os primeiros três quilómetros verifica-se apenas condições favoráveis para a ocorrência de tornados apenas para Málaga (imagens não mostradas). O BRN shear apresentou valores positivos para identificar o tornado apenas para o caso de Málaga enquanto que os valores obtidos para Silves indicaram apenas a presença de tempestades (imagens não mostradas). Analisando os resultados obtidos por Viceto (2013) existe novamente uma discrepância nos

resultados obtidos por Viceto (2013) e aqueles obtidos neste trabalho. Os valores mais evidentes estão associados à helicidade tendo Viceto (2013) obtido apenas valores favoráveis para a ocorrência de tornados para Silves, helicidade para o primeiro quilómetro, enquanto neste trabalho obteve-se valores positivos para ambos os locais. Para a helicidade para os primeiros 3km, a conclusão obtida foi a mesma. No entanto, os valores obtidos por Viceto (2013) são bastante inferiores aos obtidos neste trabalho. Ao observar os valores obtidos para o *BRN shear* por Viceto (2013) verifica-se também a existência de diferenças, tendo este autor referido a existência de condições favoráveis para ocorrência de supercélulas em ambos os tornados, enquanto que neste trabalho apenas se verifica condições favoráveis para a ocorrência de supercélulas no caso de Málaga.

Seguidamente analisar-se-á os índices de instabilidade compostos.

### 4.3. Índices compostos

Pelos motivos referidos anteriormente, em seguida mostra-se a tabela 13, que corresponde aos valores obtidos para os índices compostos.

Índice	Valor de Referência	Tornado de Silves	Tornado de Málaga
<b>BRN</b>	15 < BRN < 40 ocorrência de supercélulas	<b>30 a 40</b>	0 a 10
	BRN > 40 ocorrência de multicélulas		
<b>SWEAT</b>	SWEAT < 300	100 a 300	<b>300 a 500</b>
	Não há ocorrência de tempestades		
	300 < SWEAT < 400 ocorrência de tempestades severas		
	SWEAT > 400 ocorrência de tempestades com possibilidade de ocorrência de		

tornados				
<b>SCP</b>	SCP>2.3 ocorrência de tornados	1.4 a 2.3	<b>1 a 3</b>	
<b>CSSP(<math>m^3/s^3</math>)</b>	CSSP>20000 $m^3/s^3$ eventos severos com fortes tornados	<b>12000 a 21000</b>	6000 a 9000	
<b>STP</b>	>1 ocorrência de supercélulas	<b>1.2 a 2.1</b>	<b>0.4 a 1</b>	
<b>STP(com mICAPE)</b>	>1 ocorrência de supercélulas	<b>1 a 1.8</b>	<b>0.6 a 1.4</b>	
<b>STP (com sbCAPE)</b>	>1 ocorrência de supercélulas	<b>1 a 1.9</b>	<b>0.7 a 1.3</b>	
<b>EHI</b>	0 < EHI < 0.34	Possível ocorrência de uma tempestade	<b>0-1km :0.45 a 0.90</b>	<b>0-1 km:0.2 a 0.6</b>
	0.20 < EHI < 1.46	Possibilidade de ocorrência de supercélulas com possibilidade de ocorrência de fracos tornados	<b>0-3 km:0.8 a 1.4</b>	<b>0-3 km:0.4 a 0.6</b>
	0.42 < EHI < 2.87	Possibilidade de ocorrência de supercélulas com possibilidade de ocorrência de fortes tornados		

**Tabela 13 - Valores dos índices compostos obtidos para ambos os tornados (a negrito valores favoráveis para a ocorrência de tornados) para o domínio 3 e 4.**

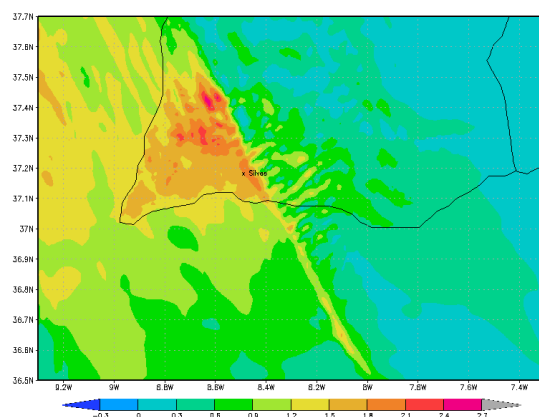
Ao observarmos os valores obtidos para os índices de instabilidade compostos verifica-se que os valores obtidos para STP, independentemente da formulação, foram superiores a 1 para ambos os casos indiciando elevada probabilidade de ocorrência de supercélulas (figura 12). Viceto



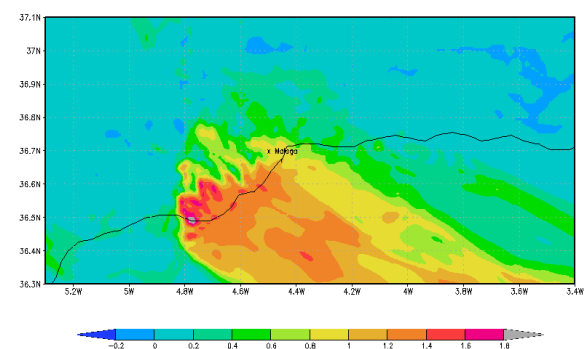
(2013) obteve resultados semelhantes, com exceção o índice STP que utiliza o sbCAPE. Este não indica a presença de ambiente favorável à ocorrência de supercélulas, no entanto neste trabalho as formulações de STP usadas são ligeiramente diferentes às utilizadas por Viceto (2013).

Analisando as imagens obtidas para este trabalho verifica-se a existência de uma linha de instabilidade com ligeira inclinação para Oeste, no caso do domínio que representa Silves. Registrando-se valores máximos de STP, independentemente da formulação, ao longo dessa linha de instabilidade, onde nem sempre os valores máximos localizam-se no local da ocorrência dos tornados. Torna-se também possível de identificar a existência de uma maior área de instabilidade favorável a ocorrência de supercélulas para o índice STP e STP (com sbCAPE). O mesmo se aplica para o domínio que representa Málaga. Para Málaga, o índice STP demonstrou uma grande extensão de valores elevados verificando-se que o máximo localiza-se mais a sudoeste do local onde foi identificado o tornado.

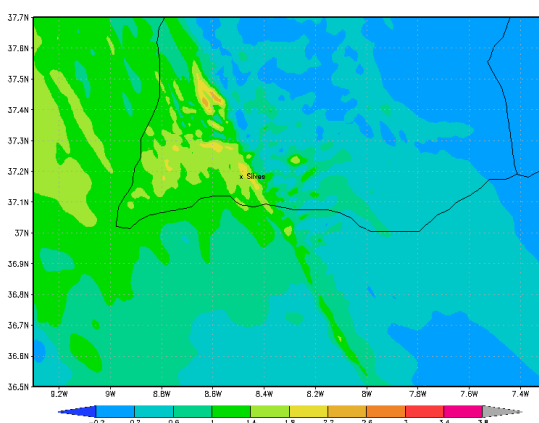
a)



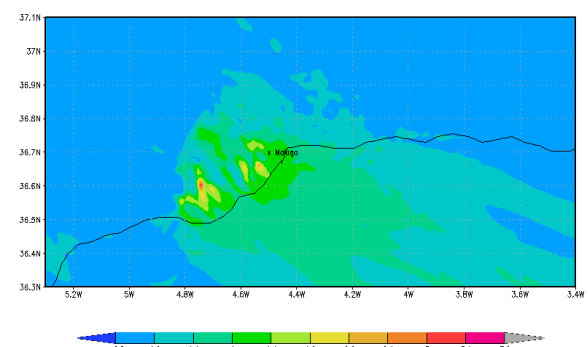
b)



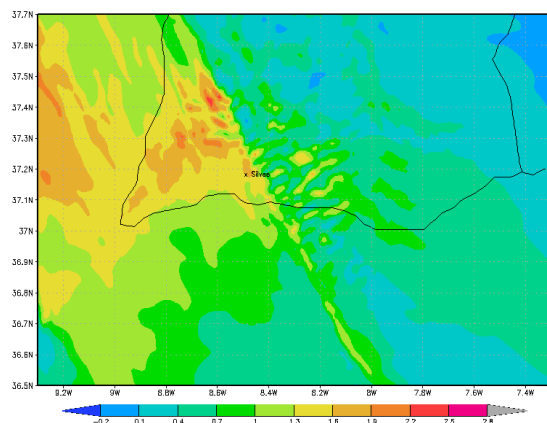
c)



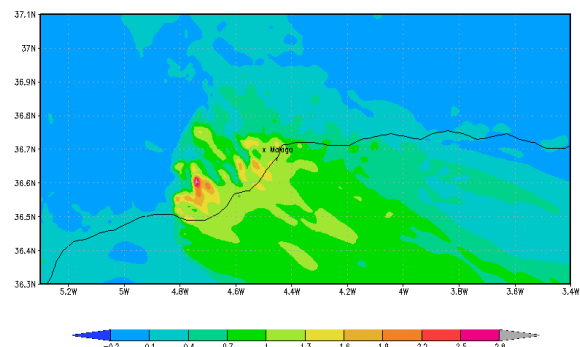
d)



e)

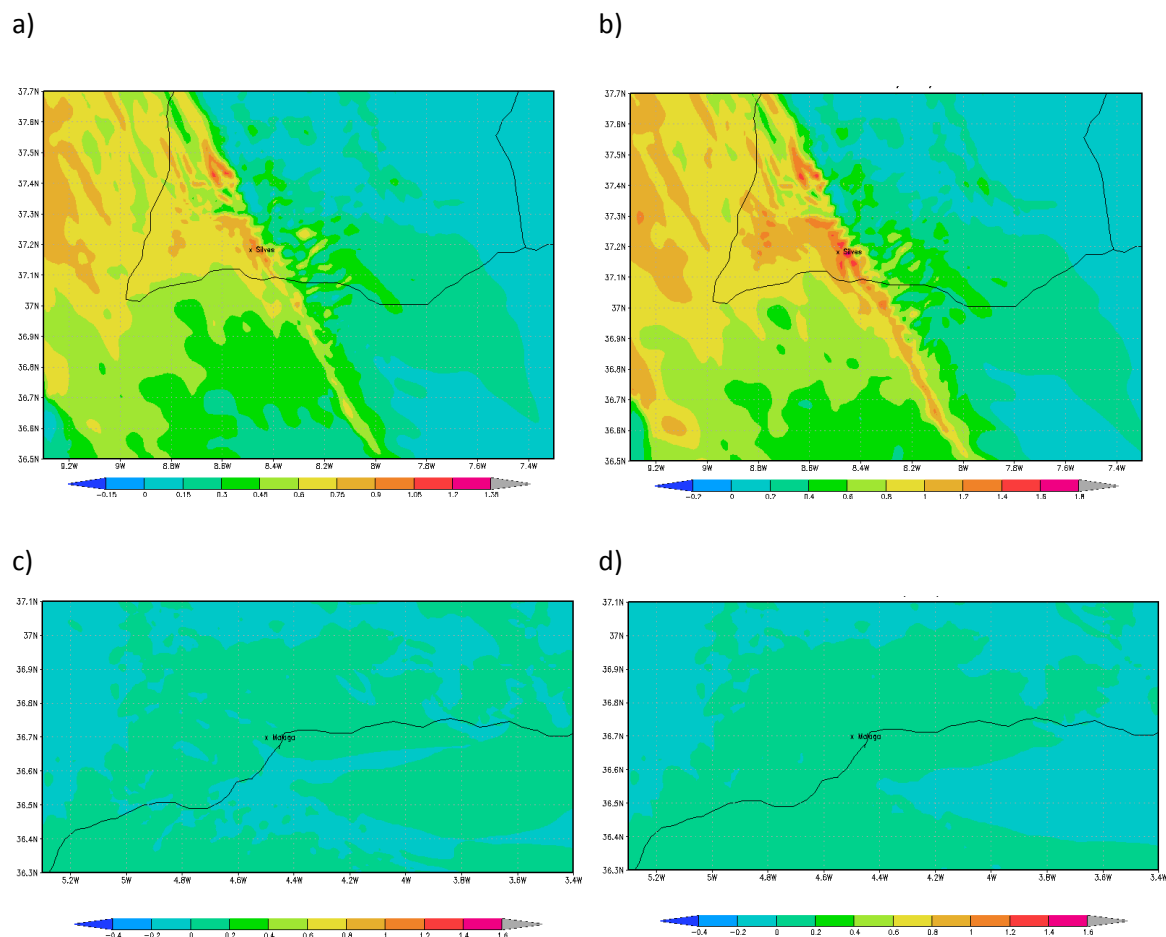


f)



**Figura 12- Índice STP onde a) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e b) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012. Índice STP (utilizando mCAPE) onde c) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e d) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012. Índice STP (utilizando sbCAPE) onde e) corresponde para Silves às 14h do dia 16/11/2012 e f) para Málaga às 11h do dia 17/11/2012.**

Apesar da variação verificada para o índice EHI os valores obtidos, para ambas as camadas, demonstram elevada probabilidade para a ocorrência de tornados podendo ser fracos ou fortes. No entanto, os valores máximos deste índice foram registados para a camada 0-3km para o tornado de Silves (figura 13). Comparando os campos acima obtidos, verifica-se que foram obtidos valores superiores para Silves quando comparado com Málaga. De notar também que este índice identifica bem a linha de instabilidade do mesmo modo que o índice STP, verificando-se também que nem sempre aos locais próximos de onde foram observados os tornados se verificam os valores máximos de EHI. Viceto (2013) não obteve valores que evidenciassem a probabilidade de tornados para o índice EHI, sendo que a formulação utilizada neste trabalho difere da utilizada por este autor, sendo que neste trabalho foi utilizado o mCAPE na determinação do índice em vez do sbCAPE como utilizou Viceto (2013).



**Figura 13- Índice EHI para Silves onde a) corresponde a EHI 0-1 km e b) corresponde a EHI 0-3 km. Índice EHI para Málaga onde c) corresponde a EHI 0-1 km e d) corresponde a EHI 0-3 km.**

Os restantes índices apresentaram valores máximos que evidenciam a probabilidade para a ocorrência de tornados apenas para um dos locais, um exemplo desse índice é o BRN que demonstra a probabilidade de ocorrência de supercélulas para Silves, assim como o índice CSSP (imagens não mostradas). O índice CSSP não foi calculado por Viceto (2013). No entanto, para Silves, o autor apresentou resultados favoráveis para a ocorrência de tornados severos. Viceto (2013), obteve resultados positivos para o índice BRN para ambos os locais, no entanto a formulação utilizada neste trabalho difere da utilizada pela colega, neste trabalho o BRN foi determinado utilizando o valor máximo de CAPE,  $\mu$ CAPE, enquanto que este autor utilizou o  $sb$ CAPE.

O índice SCP identifica a possibilidade de ocorrência de tornados para Málaga (imagens não mostradas), apesar dos valores obtidos por Viceto (2013) serem inferiores as conclusões tiradas para este índice são as mesmas. Contudo o índice SWEAT para este trabalho indicou

probabilidade de ocorrência de tempestades com tornados apenas para Málaga, no entanto Viceto (2013) obteve resultados que não indiciam existência de ambiente favorável para a ocorrência de tornados, independentemente do local.

## 5. Conclusões

Este tipo de fenómenos é de difícil “previsão” devido as suas dimensões, contudo para a sua formação é necessária a existência de instabilidade atmosférica e esta sim é possível de prever através dos modelos numéricos. No entanto, para a península ibérica os estudos efetuados sobre estes fenómenos são escassos sendo necessário desenvolver de modo a ser possível de prever a ocorrência de tornados diminuindo assim os prejuízos causados por estes assim como as vidas retiradas. Com este trabalho pretendeu-se colmatar, em parte, a grande lacuna existente na identificação de condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de tornados. Através de três tipos de índices (termodinâmicos, compostos e dinâmicos) aplicados aos tornados ocorridos em Silves e em Málaga foi possível de estabelecer grupos de índices que melhor indicam a possibilidade de ambientes favoráveis a ocorrência de tornados.

Para ambos os tornados não foram obtidos valores elevados de CAPE característicos em ambientes convectivos favoráveis a ocorrência de tornados, como presentes nos EUA, o que permite concluir que para a Península Ibérica este índice parece não ter um papel preponderante na identificação da ocorrência de tornados.

Um conjunto elevado de índices identifica de forma favorável a probabilidade de ocorrência de ambos os tornados, no entanto é necessário denotar que alguns dos índices calculados demonstram a probabilidade para a ocorrência de supercélulas não sendo obrigatória a presença de tornados.

Para os índices de instabilidade termodinâmica salientaram-se os índices referentes ao VT, CT, K e LI. Nos índices de instabilidade dinâmica salientaram-se o vento de corte e a helicidade para o primeiro quilómetro da atmosfera. Para os índices compostos é de salientar todas as formulações do índice STP assim como o índice EHI.

No entanto, alguns dos índices revelaram-se eficientes na identificação dos ambientes favoráveis para a ocorrência de tornados apenas para um dos locais em estudo. O BRN assim como o índice CSSP identificam favoravelmente a existência de supercélulas assim como a presença de fortes tornados para Silves. O índice SCP, SWEAT, BRN shear e o índice TT identificaram condições favoráveis associadas ao tornado de Málaga.

Em suma, nem todos índices calculados conseguem prever a ocorrência de tornados, obtendo resultados diferentes entre as duas regiões próximas, mas que se inserem em ambientes completamente diferentes.

Para trabalhos futuros seria interessante aplicar os mesmos índices a outros tornados ocorridos para Portugal e para Espanha, e verificar se os mesmos estarão em concordância com os resultados obtidos neste trabalho, estabelecendo assim um grupo de índices eficaz na identificação de condições atmosféricas favoráveis à ocorrência de tornados. Quando aplicados em modo de “previsão”, estes índices poderão constituir uma ajuda importante na prevenção dos efeitos associados à ocorrência de tornados.

## 6. Lista de Referências

- ✚ Aran, M., J. Amaro, J. Arús, J. Bech, F. Figuerola, M. Gayà, E. Vilaclara, 2009. *Synoptic and mesoscale diagnosis of a tornado event in Castellcir, Catalonia, on 18th October 2006*. Atmospheric Research, 93:147-160.
- ✚ Brandes, E., 1984. *Vertical vorticity generation and mesocyclone sustenance in tornadic thunderstorms: The observational evidence*. Monthly Weather Review, 112. p2253-2269.
- ✚ Brooks, H. E., J. W. Lee, and J. P. Craven, 2003. *The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data*. Atmos. Res., 67–68, 73–94.
- ✚ Bunkers, M. J., B. A. Klimowski, J. W. Zeitler, R. L. Thompson, and M. L. Weisman, 2000. *Predicting supercell motion using a new hodograph technique*. Weather Forecasting, 15, 61-79.
- ✚ Craven, J., Brooks, H., 2003. *Baseline Climatology of Sounding Derived Parameters Associated with Deep, Moist Convection*. National Weather Digest Article.
- ✚ Doswell, C. A. III, 2001. *Severe convective storms—An overview*. Severe Convective Storms, Meteor. Monogr. No. 28, Amer. Meteor. Soc., 1–26.
- ✚ Edwards, R., R. L. Thompson, 2000. *RUC2 Supercell proximity soundings, part II: An independent assessment of supercell forecast parameters*. Preprints, 20th Conf. on Severe Local Storms, Orlando, Amer. Meteor. Soc., 435-438.
- ✚ Evans, J. S., C. A. Doswell III, 2001. *Examination of Derecho environments using proximity soundings*. Wea. Forecasting, 16, 329-342. Ferreira, António Paulo, 2007- *Sensibilidade às parametrizações físicas do WRF nas previsões à superfície em Portugal Continental*.
- ✚ Grant, B. N., 1995. *Elevated Cold-Sector Severe Thunderstorms: A Preliminary Study*. National Weather Digest, 19:4, 25-31.
- ✚ Hart, J. A., W. Korotky, 1991. *The SHARP workstation vl.50 users guide*. NOAA/National Weather Service. 30 pp. [Available from NWS Eastern Region Headquarters, 630 Johnson Ave., Bohemia, NY 11716.]
- ✚ Johns R. H., C.A. Doswell III, 1992. *Severe Local Storms Forecasting*. Symposium of Weather Forecasting, 72nd AMS Annual Meeting, Atlanta.

- ✚ Johns, R.H., J.M. Davies, and P.W. Leftwich, 1990. *An examination of the relationship of 0-2 km agl "positive" wind shear to potential buoyant energy in strong and violent tornado situations*. 16th Conf. on Severe Local Storms, Kananaskis Park, Alberta, 593-598.
- ✚ Leitão, P., 2003. *Tornadoes in Portugal*, Atmospheric Research, 381-390.
- ✚ Markowski, P. M., J. M. Straka, 1998. *Variability of Storm-Relative Helicity during VORTEX*. Mon. Wea. Rev., 126, 2959–2971.
- ✚ Markowski, P. M., J. M. Straka, E. N. Rasmussen, 2002. *Direct surface thermodynamic observations within the rear-flank downdrafts of non-tornadic and tornadic supercells*. Mon. Wea. Rev., 130, 1692–1721.
- ✚ Markowski, P. M., J. M. Straka, E. N. Rasmussen, R. P. Davies-Jones, Y. Richardson, and J. Trapp, 2008. *Vortex lines within low-level mesocyclones obtained from pseudo-dual-Doppler radar observations*. Mon. Wea. Rev., 136, 3513–3535.
- ✚ Markowski, P., Richardson, Y., 2010. *Mesoscale Meteorology in Midlatitudes*, John Wiley & Sons, ISBN: 978-0-470-74213-6, 273-284pp.
- ✚ McCaul, E. W., M. L. Weisman, 1996. *The dependence of simulated storm structure on variations in the shapes of environment buoyancy and shear profiles*. Preprints, 18th Conf. on Severe Local Storms, San Francisco, CA, Amer. Meteor. Soc., 718-722.
- ✚ Moller, A. R., C. A. Doswell III, M. P. Foster, and G. R. Woodall, 1994. *The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures*. Wea. Forecasting, 9, 327–347.
- ✚ Pinto P, Leitão P., 2012. *Relatório Técnico – Tornado de Silves – 16 novembro 2012*, IPMA.
- ✚ Rasmussen, E. N., 2003. *Refined supercell and tornado forecast parameters*. Wea. Forecasting, 18, 530–535.
- ✚ Rasmussen, E. N., Blanchard, D., 1998. *A baseline climatology of sounding-derived supercell and tornado forecast parameters*. Weather and Forecasting, 13, 1148- 1164.
- ✚ Romero R, Gayà M, Doswell III C., 2007. *European climatology of severe convective storm environmental parameters: A test for significant tornado events*. Atmospheric Research 83:389-404.
- ✚ Rotunno, R., 1981. *On the evolution of thunderstorm rotation*. Mon. Weather Rev. 109, 577–586.
- ✚ Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W. , Powers, J., 2008. *A Description of the Advanced Research WRF Version 3*. NCAR technical note, 113pp.
- ✚ Stensrud, D. J., J. V. Cortinas Jr., H. E. Brooks, 1997. *Discriminating between tornadic and nontornadic thunderstorms using mesoscale model output*. Wea. Forecasting, 12, 613–632.
- ✚ Stull, R. (2000). *Meteorology for Scientists and Engineers*. Gary Garlson.
- ✚ Thompson R, Edwards R, Hart J, Elmore K., Marjowski P., 2003. *Close Proximity Soundings within Supercell Environments Obtained from the Rapid Update Cycle*. Weather and Forecasting 18: 1243-1261.
- ✚ Van Der Velde O., 2007. *Guide to using Convective Weather Maps*.
- ✚ Varmaghani, A., 2011. *An Analytical Formula for Potential Water Vapor in an Atmosphere of Constant Lapse Rate*. Terr. Atmos. Ocean. Sci. 23:17-24.

- ✚ Viceto, C.,2013. *A utilização de índices de instabilidade na previsão de condições favoráveis à formação de tornados*. Relatório de Projeto de licenciatura. Departamento de Física, Universidade de Aveiro.43 páginas.
- ✚ Weisman, M. L., J. B. Klemp, 1982. *The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy*. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 504- 520.
- ✚ Weisman, M. L., J. B. Klemp, 1984. *The structure and classification of numerically simulated convective storms in directionally varying wind shears*. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2479-2498.”.

